



Synthèse des sons par simulation des mécanismes instrumentaux : logiciel pour le processeur CORDIS -temps réel

Pierre Lacornerie

► To cite this version:

Pierre Lacornerie. Synthèse des sons par simulation des mécanismes instrumentaux : logiciel pour le processeur CORDIS -temps réel. Modélisation et simulation. Institut national polytechnique de Grenoble, 1985. Français. NNT : . tel-01269813

HAL Id: tel-01269813

<https://hal.science/tel-01269813>

Submitted on 5 Feb 2016

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers.

L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

THESE

PRESENTEE A
L'INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

pour obtenir
LE TITRE DE DOCTEUR INGENIEUR

par

PIERRE LACORNERIE

*

SYNTHÈSE DES SONS
PAR SIMULATION DES MÉCANISMES INSTRUMENTAUX :
LOGICIEL POUR LE PROCESSEUR CORDIS - TEMPS - REEL

*

Soutenue le 29 octobre 1985, devant la Commission d'Examen.

JURY

Monsieur P. SERMET

Président,

Messieurs J.C. RISSET
R. CARRÉ
R. DESCOUT
C. CADOZ

}
Examineurs.

INSTITUT NATIONAL POLYTECHNIQUE DE GRENOBLE

Président: Daniel BLOCH

Vice-Présidents: B. BAUDELET
H. CHERADAME
R. CARRE
J.M. PIERRARD

Année universitaire 1984-1985

Professeur des Universités

ANCEAU	François	E.N.S.I.M.A.G	JOUBERT	Jean-Claude	E.N.S.I.E.G
BARIBAUD	Michel	E.N.S.E.R.G	JOURDAIN	Geneviève	E.N.S.I.E.G
BARRAUD	Alain	E.N.S.I.E.G	LACOUME	Jean-Louis	E.N.S.I.E.G
BAUDELET	Bernard	E.N.S.I.E.G	LATOMBE	Jean-Claude	E.N.S.I.M.A.G
BESSON	Jean	E.N.S.E.E.G	LESIEUR	Marcel	E.N.S.H.G
BLIMAN	Samuel	E.N.S.E.R.G	LESPINARD	Georges	E.N.S.H.G
BLOCH	Daniel	E.N.S.I.E.G	LONGEQUEUE	Jean-Pierre	E.N.S.I.E.G
BOIS	Philippe	E.N.S.H.G	LOUCHET	François	E.N.S.E.E.G
BONNETAIN	Lucien	E.N.S.E.E.G	MASSELOT	Christian	E.N.S.I.E.G
BONNIER	Etienne	E.N.S.E.E.G	MAZARE	Guy	E.N.S.I.M.A.G
BOUVARD	Maurice	E.N.S.H.G	MOREAU	René	E.N.S.H.G
BRISSONNEAU	Pierre	E.N.S.I.E.G	MORET	Roger	E.N.S.I.E.G
BUYLE BODIN	Maurice	E.N.S.E.R.G	MOSSIERE	Jacques	E.N.S.I.M.A.G
CAVAIGNAC	Jean-François	E.N.S.I.E.G	PARIAUD	Jean-Charles	E.N.S.E.E.G
CHARTIER	Germain	E.N.S.I.E.G	PAUTHENET	René	E.N.S.I.E.G
CHENEVIER	Pierre	E.N.S.E.R.G	PERRET	René	E.N.S.I.E.G
CHERADAME	Hervé	U.E.R.M.C.P.P	PERRET	Robert	E.N.S.I.E.G
CHERUY	Arlette	E.N.S.I.E.G	PIAU	Jean-Michel	E.N.S.H.G
CHIAVERINA	Jean	U.E.R.M.C.P.P	POLOUJADOFF	Michel	E.N.S.I.E.G
COHEN	Joseph	E.N.S.E.R.G	POUPOT	Christian	E.N.S.E.R.G
COUMES	André	E.N.S.E.R.G	RAMEAU	Jean-Jacques	E.N.S.E.E.G
DURAND	Francis	E.N.S.E.E.G	RENAUD	Maurice	U.E.R.M.C.P.P
DURAND	Jean-louis	E.N.S.I.E.G	ROBERT	André	U.E.R.M.C.P.P
FELICI	Noël	E.N.S.I.E.G	ROBERT	François	E.N.S.I.M.A.G
FONLUPT	Jean	E.N.S.I.M.A.G	SABONNADIERE	Jean-Claude	E.N.S.I.E.G
FOULARD	Claude	E.N.S.I.E.G	SAUCIER	Gabrielle	E.N.S.I.M.A.G
GANDINI	Alessandro	U.E.R.M.C.P.P	SCHLENKER	Claire	E.N.S.I.E.G
GAUBERT	Claude	E.N.S.I.E.G	SCHLENKER	Michel	E.N.S.I.E.G
GENTIL	Pierre	E.N.S.E.R.G	SERMET	Pierre	E.N.S.E.R.G
GUERIN	Bernard	E.N.S.E.R.G	SILVY	Jacques	U.E.R.M.C.P.P
GUYOT	Pierre	E.N.S.E.E.G	SOHM	Jean-Claude	E.N.S.E.E.G
IVANES	Marcel	E.N.S.I.E.G	SOUQUET	Jean-Louis	E.N.S.E.E.G
JALINIER	Jean-Michel	E.N.S.I.E.G	VEILLON	Gérard	E.N.S.I.M.A.G
JAUSSAUD	Pierre	E.N.S.I.E.G	ZADWORN	François	E.N.S.E.R.G

Professeurs Associés

BLACKWELDER	Ronald	E.N.S.H.G	PURDY	Gary	E.N.S.E.E.G
HAYASHI	Hirashi	E.N.S.I.E.G			

Professeurs Université des Sciences Sociales (Grenoble II)

BOLLIET	Louis		CHATELIN	Françoise	
---------	-------	--	----------	-----------	--

Chercheurs du C.N.R.S

CARRE	René	Directeur de recherche	GUELIN	Pierre	Maître de recherche
FRUCHART	Robert	Directeur de recherche	HOPFINGER	Emil	Maître de recherche
JORRAND	Philippe	Directeur de recherche	JOUD	Jean-Charles	Maître de recherche
VACHAUD	Georges	Directeur de recherche	KAMARINOS	Georges	Maître de recherche
ALLIBERT	Michel	Maître de recherche	KLEITZ	Michel	Maître de recherche
ANSARA	Ibrahim	Maître de recherche	LANDAU	Ioan-Dore	Maître de recherche
ARMAND	Michel	Maître de recherche	LASJAUNIAS	Jean-Claude	Maître de recherche
BINDER	Gilbert	Maître de recherche	MERMET	Jean	Maître de recherche
BORNARD	Guy	Maître de recherche	MUNIER	Jacques	Maître de recherche
DAVID	René	Maître de recherche	PIAU	Monique	Maître de recherche
DEPORTES	Jacques	Maître de recherche	PORTSEIL	Jean-Louis	Maître de recherche
DRIOLE	Jean	Maître de recherche	THOLENCE	Jean-Louis	Maître de recherche
GIGNOUX	Damien	Maître de recherche	VERDILLON	André	Maître de recherche
GIVORD	Dominique	Maître de recherche	SUERY	Michel	Maître de recherche

.III.

Personnalités habilitées à diriger des travaux de recherche (Decision du Conseil Scientifique)

E.N.S.E.E.G.

ALLIBERT	Colette	DIARD	Jean Paul	NGUYEN TRUONG	Bernadette
BERNARD	Claude	EUSTATHOPOULOS	Nicolas	RAVAINE	Denis
BONNET	Roland	FOSTER	Panayotis	SAINFORT	(CENG)
CAILLET	Marcel	GALERIE	Alain	SARRAZIN	Pierre
CHATILLON	Catherine	HAMMOU	Abdelkader	SIMON	Jean Paul
CHATILLON	Christian	MALMEJAC	Yves (CENG)	TOUZAIN	Philippe
COULON	Michel	MARTIN GARIN	Régina	URBAIN	Georges (Laboratoire des ultraréfractaires ODEILLO).

E.N.S.E.R.G.

BARIBAUD	Michel	CHEHIKIAN	Alain	HERAULT	Jeanny
BOREL	Joseph	DOLMAZON	Jean Marc	MONLLOR	Christian
CHOVET	Alain				

E.N.S.I.E.G.

BORNARD	Guy	KOFMAN	Walter	MAZUER	Jean
DESCHIZEAUX	Pierre	LEJEUNE	Gérard	PERARD	Jacques
GLANGEAUD	François			REINISCH	Raymond

E.N.S.H.G.

ALEMANY	Antoine	MICHEL	Jean Marie	ROWE	Alain
BOIS	Daniel	OBLÉD	Charles	VAUCLIN	Michel
DARVE	Félix			WACK	Bernard

E.N.S.I.M.A.G.

BERT	Didier	COURTOIS	Bernard	FONLUPT	Jean
CALMET	Jacques	DELLA DORA	Jean	SIFAKIS	Joseph
COURTIN	Jacques				

U.E.R.M.C.P.P.

CHARUEL	Robert
---------	--------

C.E.N.G.

CADET	Jean	JOUBE	Hubert (LETI)	PERROUD	Paul
COEURE	Philippe (LETI)	NICOLAU	Yvan (LETI)	PEUZIN	Jean Claude (LETI)
DELHAYE	Jean Marc (STT)	NIFENECKER	Hervé	TAIEB	Maurice
DUPUY	Michel (LETI)			VINCENDON	Marc

Laboratoires extérieurs :

C.N.E.T.

DEMOULIN	Eric	GERBER	Roland	MERCKEL	Gérard
DEVINE	R.A.B.			PAULEAU	Yves

I.N.S.A. Lyon

GAUBERT	C.
---------	----

ECOLE NATIONALE SUPERIEURE DES MINES DE SAINT-ETIENNE

Directeur : Monsieur M. MERMET
 Directeur des Etudes et de la formation : Monsieur J. LEVASSEUR
 Directeur des recherches : Monsieur J. LEVY
 Secrétaire Général : Mademoiselle M. CLERGUE

Professeurs de 1ère Catégorie

COINDE	Alexandre	Gestion
GOUX	Claude	Métallurgie
LEVY	Jacques	Métallurgie
LOWYS	Jean-Pierre	Physique
MATHON	Albert	Gestion
RIEU	Jean	Mécanique - Résistance des matériaux
SOUSTELLE	Michel	Chimie
FORMERY	Philippe	Mathématiques Appliquées

Professeurs de 2ème catégorie

HABIB	Michel	Informatique
PERRIN	Michel	Géologie
VERCHERY	Georges	Matériaux
TOUCHARD	Bernard	Physique Industrielle

Directeur de recherche

LESBATS	Pierre	Métallurgie
---------	--------	-------------

Maîtres de recherche

BISCONDI	Michel	Métallurgie
DAVOINE	Philippe	Géologie
FOURDEUX	Angeline	Métallurgie
KOBYLANSKI	André	Métallurgie
LALAUZE	René	Chimie
LANCELOT	Francis	Chimie
LE COZE	Jean	Métallurgie
THEVENOT	François	Chimie
TRAN MINH	Canh	Chimie

Personnalités habilitées à diriger des travaux de recherche

DRIVER	Julian	Métallurgie
GUILHOT	Bernard	Chimie
THOMAS	Gérard	Chimie

Professeur à l'UER de Sciences de Saint-Etienne

VERGNAUD	Jean-Maurice	Chimie des Matériaux & chimie industrielle
----------	--------------	--

Le travail présenté dans ce mémoire a été effectué à l'Ecole Nationale Supérieure d'Electronique et de Radioélectrité puis à l'Ecole Nationale Supérieure d'Informatique et de Mathématiques Appliquées de Grenoble. Que les directions respectives de ces établissements veuillent ici trouver les remerciements qui leurs sont dus.

Je remercie vivement toutes les personnes des services généraux de ces deux établissements qui m'ont aidé, à un moment ou à un autre, dans l'accomplissement des démarches que j'ai eu à effectuer.

Je remercie Monsieur René CARRE, Directeur de l'Institut de La Communication Parlée, et Monsieur Philippe JORRAND, Directeur du Laboratoire d'Informatique Fondamentale et d'Intelligence Artificielle (L.I.F.I.A) pour m'avoir successivement accueilli dans leurs laboratoires.

Je remercie l'équipe Informatique Musicale et Graphique du L.I.F.I.A pour m'avoir permis de travailler dans son domaine de recherche. Je tiens à souligner les collaborations particulièrement efficaces que j'ai pu avoir avec différents de ses membres.

Je remercie les personnes qui me font l'honneur de participer à ce jury, Monsieur Pierre SERMET, qui en a accepté la présidence, et Messieurs Claude CADOZ, René CARRE, Raymond DESCOUT et Jean-Claude RISSET.

INTRODUCTION.	7
PARTIE A : LA RECHERCHE MUSICALE.	
<u>1. LA MAITRISE DU SIGNAL SONORE.</u>	9
1.1 Constat.	
1.2 L'ordinateur.	
1.2.1 Composition automatique.	
1.2.2 La synthèse directe des sons.	
1.3 Recherche et musique.	
1.4 Deux attitudes.	
<u>2. LA SYNTHESE DIRECTE DES SONS.</u>	13
2.1 L'origine : les programmes MUSIC3, MUSIC5..	
2.2 Premiers travaux psychoacoustiques.	
2.3 Paramètres acoustiques et algorithmes efficaces et spécialisés.	
2.4 Synthèse rapide et contrôle gestuel en temps réel.	16
2.4.1 Les gestes du "chef d'orchestre".	
2.4.2 Contrôle gestuel du timbre.	
2.4.3 Geste et composition.	
2.5 Dialogue homme-machine et synthèse directe des sons.	18
2.5.1 MUSIC5.	
2.5.2 Le projet SSSP.	
2.5.3 Nouvelle direction.	
2.6 Psychoacoustique.	21
2.6.1 Trois exemples de modifications d'enveloppe spectrale.	
2.6.2 Fusion /scission.	
2.6.3 Espace des timbres.	
2.6.4 Changer la perception.	

<u>3. LA PERCEPTION.</u>	29
3.1 La perception, phénomène actif.	
3.2 La perception du musicien.	
3.3 La perception, phénomène multisensoriel.	
3.4 Remarque critique concernant la psychoacoustique.	
3.4.1 Limite de la notion d'espace des timbres.	
3.4.2 Le jugement des auditeurs.	
3.5 La représentation.	
 <u>4. L'ordinateur comme "outil de création"</u>	 35
<u>Nécessité d'une prise en compte de l'expérience instrumentale.</u>	
4.1 Introduction.	
4.2 Remarque concernant la synthèse d'image par ordinateur.	
4.3 Limite de la synthèse acoustique comme moyen de création musicale.	
4.3.1 L'ordinateur moyen de représentation.	
4.3.2 La synthèse directe des sons est une démarche du compositeur.	
4.3.3 L'expérience du compositeur.	
4.3.4 La fonction symbolique des sons.	
4.4 L'ordinateur moyen de représentation de l'univers instrumental.	
4.5 L'outil de création.	
 <u>5. CONCLUSION.</u>	 40

PARTIE B : SYSTEME POUR LA SYNTHÈSE DES SONS PAR
SIMULATION DES MECANISMES INSTRUMENTAUX
EN TEMPS-REEL.

<u>1. INTRODUCTION.</u>	43
<u>2. LE SYSTEME CORDIS.</u>	45
2.1 les activités de création.	
2.2 Les mécanismes instrumentaux.	
2.3 Le geste instrumental.	
2.3.1 Typologie du geste instrumental.	
2.3.2 Geste et transducteurs.	
<u>3. PREMIERES REALISATIONS.</u>	49
3.1 Les transducteurs gestuels rétroactifs.	
3.2 Le programme CORDIS logiciel (version 2).	50
3.2.1 Introduction.	
3.2.2 Principe de modélisation et d'algorithmique.	
3.2.3 Les modules de CORDISV2.	
3.2.4 Les algorithmes.	
3.2.5 Exemple : la corde vibrante.	
3.3 Remarques.	54
3.3.1 Langage/modélisation/algorithmique.	
3.3.2 Equation différentielle, filtrage numérique, processus récurifs, et synthèse sonore.	
3.3.3 Problèmes liés à l'algorithmique de CORDISV2.	
3.4 Conclusion.	

<u>4. LE PROCESSEUR CORDIS-TEMPS-REEL.</u>	59
4.1 Introduction.	
4.2 Rôle et principe d'utilisation.	
4.3 La communication CTR-LSI.	
4.4 Architecture et fonctionnement du CTR.	61
4.4.1 Introduction.	
4.4.2 Architecture générale.	
4.4.3 L'interface de communication CTR-LSI.	
4.4.4 Les mémoires accessibles par l'interface.	
4.5 Le jeu d'instructions et les microprogrammes du CTR.	64
4.5.1 Introduction/définitions.	
4.5.2 Les modules internes.	
4.5.3 Les modules d'entrée-sortie lente.	
4.5.4 Modules de sortie sonore.	
4.5.5 Ordre d'un programme.	
4.5.6 Remarques.	
<u>5. MISE AU POINT DU PROCESSEUR CTR.</u>	71
5.1 Premiers test globaux du CTR.	
5.1.1 Première étape.	
5.1.2 Geste instrumental en temps réel.	
5.1.3 Conclusion.	
5.2 Tests systématiques et remaniements du CTR.	73
5.2.1 Introduction.	
5.2.2 Remaniement du conditionnement du CTR.	
5.2.3 Programmes de test de l'interface et du CTR à l'arrêt.	
5.2.4 Test des modules du CTR.	
5.2.5 Communication LSI-CTR en phase de jeu.	
5.2.5.1 Filtre d'adaptation du CTR.	
5.2.5.2 Remaniements de la communication LSI-CTR.	

6. LA MAQUETTE CORDIS.	77
6.1 Contexte général.	
6.1.1 Point de la situation.	
6.1.2 Les étapes dans la construction d'un "outil de création".	
6.1.3 Le langage.	
6.2 Contexte matériel de la maquette CORDIS.	
6.3 Les trois modes de l'activité de création.	
6.4 Le langage Cordis temps-réel (LCTR).	83
6.4.1 Le sous-langage de construction de l'instrument (LCI).	
6.4.1.1 Les éléments.	
6.4.1.2 La liste des éléments.	
6.4.1.3 Actions sur les éléments.	
6.4.1.4 Les constituants intermédiaires.	
6.4.1.5 Les ensembles d'instruments.	
6.4.1.6 Les connecteurs.	
6.4.1.7 Le système d'unités.	
6.4.1.8 Le mode opératoire dans la construction de l'instrument.	
6.4.2 Le sous-langage de jeu (LJ).	
6.4.2.1 Les dispositions de jeu.	
6.4.2.2 Le mode opératoire pour jouer d'un ensemble d'instruments.	
6.4.3 Le sous-langage de composition (LC).	
6.4.3.1 Introduction.	
6.4.3.2 La registration.	
6.4.3.3 Jeu d'une registration.	
6.4.4 Le langage de commande.	
6.5 Le logiciel Cordis temps-réel (LCTR).	101
6.5.1 Introduction.	
6.5.2 La partie "dialogue" du "LCTR".	
6.5.2.1 Les outils logiciels disponibles.	
6.5.2.2 Une contrainte matérielle.	
6.5.2.3 Représentation des objets du "LCI".	
6.5.2.4 Remarques.	
6.5.3 La partie "calcul" du "LCTR".	
6.5.3.1 La génération des codes pour le CTR.	
6.5.3.2 Ecriture des modules de calcul des éléments lents.	
6.5.3.3 fabrication et gestion de la boucle de jeu.	
6.5.4 Les étapes dans la réalisation du "LCTR".	
7. CONCLUSION.	107
ANNEXE : Algorithmes de simulation de CORDISV2.	111
BIBLIOGRAPHIE.	123

INTRODUCTION

.. la musique, [est], le suprême mystère des sciences de l'homme, celui contre lequel elles butent et qui garde la clef de leur progrès.

Claude LEVI-STRAUSS, le cru et le cuit (p26)

Le développement au vingtième siècle, surtout après 1945, de techniques permettant une mémorisation objective et des traitements d'événements (sonores, visuels...), donne une impulsion décisive et des outils communs aux diverses sciences de la communication humaine : phonétique, acoustique, psychologie de la perception, esthétique... C'est à l'informatique que l'on pense aujourd'hui en premier lieu.

Ces techniques, si elles conduisent à analyser certains objets de la communication humaine (parole, images, musique...), à s'interroger sur les processus de leur création et de leur perception, proposent corrélativement des moyens de synthèse mais aussi de création d'objets de communication. Ces nouveaux objets nourrissent à leur tour l'analyse et, proposent d'autres méthodes de création.

En ce qui concerne l'outil informatique, cette dynamique permet une critique voire la déduction de directions pour perfectionner le système informatique lui-même (amélioration du dialogue homme-machine...) puis, à nouveau la connaissance du processus de communication humain. Ce phénomène de spirale où l'outil se développe autour des exigences propres à ses applications est sans précédent.

La musique aura ici valeur d'exemple.

Le système informatique qui constitue le travail pratique de cette thèse est destiné à expérimenter un processeur spécialisé pour la synthèse sonore en temps réel à partir de la simulation de mécanismes vibratoires. L'ensemble logiciel et matériel constitue une maquette d'un outil de création musicale mis en oeuvre dans le cadre d'un projet de recherche global défini par ailleurs ([CADOZ 1981] principalement). Ce projet, appelé CORDIS-ANIMA est à situer dans le contexte général de l'informatique musicale.

La première partie (*) de ce rapport traitera de la problématique, des moyens, de certains résultats de la recherche en informatique musicale. On présentera alors l'approche spécifique dans laquelle ce travail de thèse s'intègre. Cette approche détermine le principe du système de synthèse sonore par simulation des mécanismes instrumentaux : CORDIS. Une deuxième partie décrira la maquette proprement dite. Elle est la première réalisation temps réel du système CORDIS.

(*) Les renvois aux différents paragraphes de la première partie seront précédés de la lettre "A" (respectivement "B" pour la seconde partie).

PREMIERE PARTIE

LA RECHERCHE MUSICALE

1. LA MAITRISE DU SIGNAL SONORE.

1.1. Constat.

Le vingtième siècle a vu l'irruption de l'électronique dans la pratique musicale. C'est surtout après la deuxième guerre mondiale que l'utilisation des techniques électroacoustiques (prise de son, découpe et manipulation de bande magnétique, filtrage, mixage de sons, synthèse analogique...) s'est généralisé. Ces techniques bouleversent les données matérielles de la création musicale. Pierre SCHAEFFER(1957), inventeur de la musique concrète à PARIS en 1948, résumait la situation des chercheurs de l'époque en quatre points :

"Tous remettent en cause la notion d'instrument. Le son ne saurait plus être caractérisé par son élément causal, mais par l'effet pur. Aussi doit-il être classé, non selon l'instrument qui le produit, mais selon sa morphologie propre...

Corrélativement, il faut admettre que la notion de note de musique, liée intimement au caractère causal de l'instrument, ne suffit plus à rendre compte de l'objet sonore...

les relations classiques entre composition et exécution, entre auteurs et instrumentistes, se voient également profondément modifiées...

Le contact avec le public est lui aussi différent..."

Ce constat est toujours d'actualité.

1.2. L'ordinateur

1.2.1. Composition automatique

L'ordinateur a fait sa première apparition dans le domaine de la musique vers 1956 avec les expériences de composition automatique réalisées par HILLER et ISAACSON(1958) à l'université de l'Illinois.

"L'ordinateur engendre au hasard une suite de nombres représentant des éléments musicaux (par exemple, les hauteurs de notes de musique); ces nombres sont passés au crible de tests restrictifs traduisant des règles de composition : seuls sont retenus ceux des nombres qui satisfont les règles choisies." [RISSET 1975b]

Ces nombres constituent une partition codée, transcrite ensuite en notation traditionnelle avant d'être exécutée par des interprètes.

1.2.2. La synthèse directe des sons.

Les ordinateurs étaient utilisés à la Bell-Telephone pour synthétiser de la parole, des stimuli psychoacoustiques et faire des recherches sur l'intelligibilité. Les expériences ne se limitent pas à ces domaines. MATHEWS(1963), vers 1958, conçoit des programmes généraux de synthèse sonore où le son est décrit en termes de forme d'onde. C'est cette utilisation de l'ordinateur (cf fig. 1) qui prolonge les recherches électroacoustiques sur le son. Jean-Claude RISSET(1977a) explique :

"Ce qui me paraît intéressant, c'est de se servir de l'ordinateur pour composer au niveau même du matériau, c'est-à-dire, comme on dit, de ne pas composer seulement avec des sons, mais de composer aussi le son, et c'est là qu'une nouveauté est possible. Même si des tentatives de ce genre ont eu lieu sans l'ordinateur, c'est seulement avec celui-ci, peut-être, que le type de contrôle qu'on pourra avoir au niveau de la micro-structure du son, sera de même nature, du même degré de raffinement que celui qu'a l'habitude d'exercer le compositeur sur la macro-structure".

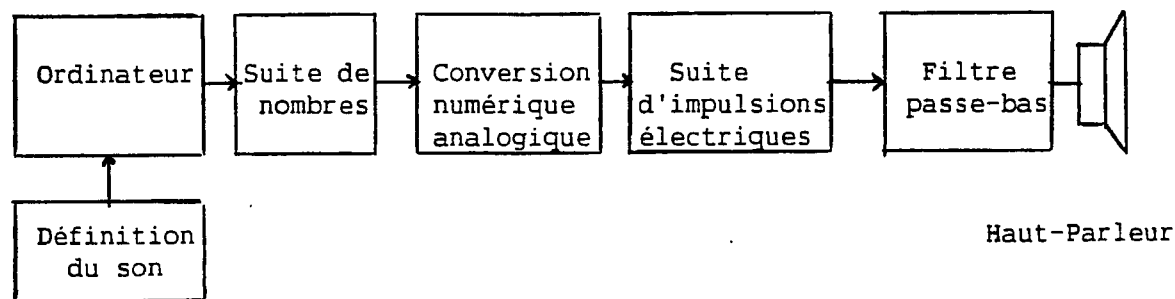


Figure 1

Schéma général de la synthèse directe des sons [CHARBONNEAU 1972]

L'apport de l'informatique est décisif :

- On peut obtenir par synthèse directe du son n'importe quel signal audible dont les fréquences n'excèdent pas B hertz, pourvu qu'on ait au moins 2B échantillons par seconde. Les limites éventuelles proviennent de l'utilisation d'un haut-parleur.

- Par extension, (utilisation d'une chaîne micro-conversion analogique-numérique) cette méthode permet aussi les manipulations propres à la musique concrète, c'est-à-dire le traitement des sons enregistrés [MAILLARD 1982, HAYNES 1980].

- L'ordinateur permet un travail transmissible et cumulatif grâce à sa programmabilité; Jean-Claude RISSET cite, par exemple, les travaux sur la synthèse des sons cuivrés [RISSET 1969, CHOWNING 1973, MORRILL 1977].

1.3. Recherche et musique.

Les écrits précités soulignent bien l'importance du signal sonore en lui-même comme un nouveau moteur de la création musicale. Une recherche se bâtit alors autour de ces sons maîtrisés de façon objective et permanente (au contraire du son d'instrument de musique). Elle vise à mettre en relation le signal sonore et la sensation perçue.

"En proposant l'étude des objets musicaux (*), préalablement à celle de leur emploi (l'écriture, la composition), nous risquons de surprendre les uns, de décourager les autres. Pour les uns, cette recherche ne se justifie finalement qu'au niveau du langage, et les chercheurs les plus sérieux pourront douter que nous puissions nous arrêter ainsi en chemin. Pour les autres, les compositeurs notamment, cette recherche va contre leur instinct, qui est d'oeuvrer directement à la musique.... Aux uns comme aux autres nous sommes obligés de poser ces questions préalables : "Avec quels matériaux fait-on de la musique? Dans ce que nous percevons, quel rôle joue le conditionnement? Quelles sont, au delà de ce conditionnement, les virtualités du sonore, tant par les propriétés physiques des objets que par celles des structures de perception dont l'homme, naturellement doté, peut poursuivre le développement? ""[SCHAEFFER 1966 p360].

Les chercheurs qui travaillent sur la synthèse directe des sons posent le problème en termes de psychoacoustique. MATHEWS(1963) soulignait que nous savions peu de la relation existant entre le son perçu et la forme d'onde. RISSET(1971) indique : " ce qui fait défaut, c'est un corps de connaissances psychoacoustiques, une science des corrélations entre paramètres physiques et timbre perçu des sons".

1.4. Deux attitudes.

SCHAEFFER s'engage alors dans la définition d'un solfège généralisé car, dit-il, "faire croire au musicien qu'il est indispensable d'apprendre l'acoustique et l'électricité est une mauvaise action" [SCHAEFFER 1957]. Cette attitude le conduira à la rédaction du "Traité des Objets musicaux, essai interdisciplines" (1966). Puis, il adopte un comportement de plus en plus critique voire sceptique vis-à-vis des techniques contemporaines de création musicale [SCHAEFFER 1975,1977].

(*) Par objet musical, il faut entendre non pas le signal physique ni la cause de ce signal mais l'objet de notre perception musicale.

Les chercheurs travaillant sur la synthèse directe des sons adoptent un point de vue plus technique.

RISSET(1970) explique : "Ainsi pour tirer effectivement parti des ressources sonores immenses de l'ordinateur, il faut acquérir une science psychoacoustique, une profonde connaissance des corrélations entre paramètres physiques et caractères sensibles des sons.[...] P. Schaeffer et son Groupe de Recherche Musicale ont apporté ici une contribution très importante : [...] Le solfège schaefferien [...] ne constitue pas un système de description suffisamment différencié pour qu'on puisse en déduire un langage apte à commander les multiples ressources de la synthèse des sons par ordinateur."

Pour MATHEWS(1970), "il est clair que le studio de l'avenir demandera au compositeur de grandes connaissances techniques. Non seulement il devra être bon programmeur, mais, de plus, il devra apprendre l'art des techniques électriques. Il est peut-être déraisonnable de demander toutes ces compétences à un musicien". Si cela est, une alternative possible est de confier la composition à une équipe composée d'un musicien et d'un ingénieur".

Pour CHOWNING(1981), "L'acquisition d'une certaine compétence de programmation peut être utile au compositeur puisqu'elle est la clé d'une compréhension générale des systèmes informatiques... la capacité de programmer offre aussi au compositeur une certaine indépendance à l'un des niveaux où l'indépendance est la plus souhaitable : la synthèse".

MOORE(1982) pense aussi qu'une utilisation non triviale de l'ordinateur suppose en fin de compte la connaissance de la programmation.

Ces considérations renvoient au problème général du dialogue et des interfaces homme-machine, des langages à proposer au musicien. Donnons un aperçu des outils et des méthodes disponibles dans le cadre de la synthèse directe des sons.

2. LA SYNTHÈSE DIRECTE DES SONS.

Deux articles [RISSET & WESSEL 1982], [RISSET 1983] résument l'histoire et l'impact scientifique sur l'acoustique et la psychoacoustique du procédé. L'exposé qui suit n'est pas exhaustif et ne développe que les aspects essentiels à notre propos.

2.1. L'origine : les programmes MUSIC3, MUSIC5..

"Dès 1960, avec le programme MUSIC3, était défini le prototype du programme général de synthèse... Loin de simuler les synthétiseurs à modules commandés par tension, proposés par MOOG et BUCHLA vers 1965, les concepts de MUSIC3 les ont précédés et sans doute inspirés. MUSIC3 a eu de nombreux descendants : MUSIC4 et surtout MUSIC5 (MATHEWS 1969], facile à transporter sur des ordinateurs différents, MUSIC10, MUSIC11, MUSIC360 ; les principes ont été repris dans la conception de nombreux synthétiseurs numériques"[RISSET 1983].

Le langage proposé par un programme de la famille MUSIC partage la détermination d'un événement sonore en deux phases :

- la définition d'une structure dite "instrument" qui décrit l'algorithme de synthèse. Un "instrument" est la combinaison d'un ensemble de modules élémentaires tels que oscillateurs, enveloppes, additionneurs, générateurs de nombres aléatoires...
- la définition de "notes", soit pour chaque "note", une liste de paramètres où sont précisés l'instant d'intervention de "l'instrument" et des paramètres acoustiques tels que fréquence, amplitude du vibrato.. qui "activent l'instrument".

L'ensemble des événements sonores constitue une "partition". La "partition" conduit au calcul en temps différé des échantillons sonores.

Les termes "instrument" et "note" ne sont utilisés que par analogie car, en fait, une "note" n'est souvent qu'un élément constitutif du signal et ne correspond pas à une entité perceptive [MATHEWS 1974],[CADOZ 1979p23], [RISSET 1982]. La séparation "instrument", "note" introduit un formalisme fructueux pour élaborer la construction des sons, plus parlant qu'une formulation algorithme/paramètre, mais sans rapport ni avec l'instrument traditionnel, ni le jeu avec cet instrument.

2.2. Premiers travaux psychoacoustiques.

Ils montrent l'insuffisance de l'acoustique traditionnelle. Il n'y a pas bijection entre, d'une part hauteur, timbre et durée (paramètres perçus d'un son) et, d'autre part fondamental, spectre et durée physique [SCHAEFFER 1966],[MATHEWS 1969]. Des résultats paradoxaux sont obtenus concernant l'attribut de hauteur [RISSET 1971,1977]. Celui-ci peut être décomposé en deux dimensions. La synthèse permet de dissocier ces dimensions, habituellement corrélées. Cela conduit à des perceptions telles que sons montant indéfiniment, sons montant la gamme tout en devenant plus graves..[SHEPPARD 1966],[RISSET 1971],[CHARBONNEAU & RISSET 1973, 1975a,b].

Le principal des travaux porte sur la notion de timbre et tout d'abord celle de timbre instrumental. Par timbre instrumental, il faut entendre l'attribut du son qui rassemble toutes ses caractéristiques autres que hauteur, durée, puissance et localisation spatiale (cf GREY 1975). Les travaux sur l'imitation des timbres instrumentaux montrent qu'un tel timbre est souvent mieux caractérisé par une loi de variation que par des invariants. Par exemple, pour les cuivres la proportion d'harmoniques aiguës du spectre augmente avec l'intensité [RISSET 1969]. Ces propriétés sont extrapolées pour rendre un timbre synthétique musicalement intéressant.

2.3. Paramètres acoustiques et algorithmes efficaces et spécialisés.

MUSIC5 est un programme général qui ne suggère guère de méthodes de synthèse sinon la synthèse additive. Cette dernière n'est pas le moyen le plus simple pour fabriquer des spectres à "loi de variation" (cf A.2.2). Un ensemble de méthodes de synthèse dite "globale" est inventé. Elles permettent, avec peu de paramètres de contrôle d'"instrument" MUSIC5, de fabriquer des sons dont les composantes spectrales varient en fréquence et en amplitude.

CHOWNING(1973) introduit l'utilisation de la modulation de fréquence. Pour les sons cuivrés, son "instrument" MUSIC5 est plus efficace que celui de RISSET(1969) car il utilise bien moins de modules. MOORER(1976) propose l'utilisation de formules de sommation, ARFIB(1979) et LEBRUN(1979) des techniques de modulation d'amplitude et de distorsion.

Les différentes techniques de traitement du signal utilisées dans le champ de l'informatique musicale sont passées en revue dans plusieurs écrits ([MOORER 1977], [ALLES 1980], [LACORNERIE 1981], [DE POLI 1984]). Outre les méthodes précitées, d'autres, non liées à la combinatoire MUSIC5, s'inspirent de celles utilisées en analyse-synthèse de la parole : prédiction linéaire (à 55 coefficients [MOORER 1978]), VOSIM (contraction de "voice simulation" [KAEGI et TEMPELAARS 1978]), synthèse par ondes formantiques (programme CHANT [RODET 1982, 1984]). Cette dernière apporte une dimension supplémentaire ; elle est à la fois un bon modèle de production de la voix et un modèle efficace pour la perception (l'oreille est très sensible à la position des formants); les nombreux paramètres (une centaine) y ont donc une signification et des variations plus explicites que pour un modèle reposant sur les propriétés d'une formule.

Dans tous les cas, on dispose d'un algorithme et d'un jeu de paramètres qui peuvent s'exprimer en termes de traitement du signal, soit de paramètres acoustiques tels que : amplitude, index de modulation, fréquence, bruit aléatoire, polynôme représentant la distorsion d'une onde sinusoïdale...

Cette multiplicité de méthodes est problématique. Leurs applications peuvent, entre autres, conduire à des résultats similaires. Or, on ne connaît guère les règles de passage d'une méthode à l'autre, qui permettrait de s'affranchir de la spécificité de l'algorithme pour ne s'intéresser qu'à l'effet auditif. Les paramètres choisis sont efficaces pour la commande du spectre du signal mais il reste à les corrélérer à des effets perceptifs. Ceci renvoie à l'absence de relation exacte entre signal acoustique et objet sonore, entre les données de l'acoustique et la perception auditive (cf A.2.2).

2.4. Synthèse rapide et contrôle gestuel en temps réel.

Une des préoccupations essentielles des quinze dernières années a été de réduire au maximum le temps s'écoulant entre la description et l'écoute du son. Grâce aux progrès de la technologie et à l'utilisation de techniques efficaces de synthèse, les calculs sont quelquefois suffisamment rapides pour permettre le "temps-réel". On entend par là que certains aspects du son sont contrôlés en ligne, par des gestes d'un opérateur humain. La technologie actuelle oblige néanmoins les dispositifs puissants de synthèse sonore à se construire à partir d'un doublet machine hôte-périphérique spécialisé, (ce périphérique est aussi appelé synthétiseur numérique), calculant les échantillons sonores.

La plupart des centres de recherche construisent ou ont construit leur périphérique spécialisé : citons, par exemple, la famille de machines 4A, 4B, 4C, 4X de l'IRCAM (Institut de Recherche et Coordination Acoustique/Musique) [DI GIUNIO 1976, 1981] [MOORER 1979], le processeur SYTER au GRM (Groupe de Recherche Musicale) [ALLOUIS 1976, 1979], le SCDS (System Concept Digital Synthesizer) à STANFORD [SAMSON 1980], le processeur de LUCASFILM [MOORER 1982]...

L'obtention d'une séquence sonore dans le cadre de la synthèse directe des sons en temps réel s'effectue en deux étapes :

- description d'une combinaison de modules (oscillateur, filtre, générateur de bruit...), soit l'équivalent d'un instrument MUSIC5 puis chargement de cette combinaison dans le périphérique.
- envoi par l'ordinateur hôte d'un flux de données vers ce périphérique. Une partie de ce flux peut provenir du traitement de données numériques issues d'un dispositif spécial appelé "accès" [DURR 1976] ou "transducteur" [CADOZ 1978], [BUXTON 1980]. Ces dispositifs transmettent à l'hôte ou directement au processeur l'image numérique d'un geste de l'opérateur.

Un problème délicat est la coordination du flux de données à transmettre au synthétiseur avec les calculs de ce dernier. Pour réaliser certains sons, ce flux est quasiment du même ordre que le flux d'échantillons sonores calculés. MOORER(1981) explique qu'une cadence d'envoi de 960 paramètres par seconde est une moyenne banale, que la position d'un bruit d'archet doit être précise à quelques échantillons sonores près.

2.4.1. Les gestes du "chef d'orchestre".

Le système GROOVE (Generate Real Time Operations On Voltage controlled Equipment) [MATHEWS 1970], constitue la référence des travaux ultérieurs portant sur le contrôle gestuel. Un synthétiseur analogique est placé sous le contrôle d'un ordinateur. Les commandes

sont élaborées à partir de fonctions du temps stockées en mémoire. Le programme permet de lire les échantillons des fonctions en mémoire, de les combiner avec les entrées (accès gestuels), d'en déduire en temps réel les commandes pour le synthétiseur et de ranger éventuellement ces commandes en mémoire. Le concept mis en avant est celui du "chef d'orchestre" décidant des nuances de dynamique, de tempo, de phrasé, d'équilibre des parties... (le quatuor de RAVEL, exemple de synthèse effectuée avec GROOVE, peut ainsi être "interprété" de façon très différente selon l'utilisateur).

C'est encore des contrôles de type chef d'orchestre que préconisent MATHEWS et ABBOTT(1980) autour d'un accès de leur invention, le Sequential Drum. Il s'agit d'une surface rectangulaire de la dimension d'une tablette graphique destinée à être frappée par le musicien. Il fournit à la machine 4C de l'IRCAM quatre signaux : un signal de synchronisation lors de la frappe de l'accès, un signal proportionnel à la force de la frappe, deux positions représentant l'endroit de la frappe.

L'équipe de TORONTO [BUXTON 1980] propose aussi, autour de leur synthétiseur [BUXTON 1978], de tels gestes contrôlant une partition précomposée pour permettre l'exécution de consignes telles que "un peu plus de cuivres, les violons plus staccato".

2.4.2. Contrôle gestuel du timbre.

Les deux positions fournies par le Sequential Drum peuvent être utilisées pour sélectionner un timbre particulier. Il existe dans le commerce des claviers dits "sensitifs" qui prennent en considération la vitesse d'enfoncement d'une touche pour calculer une interpolation entre deux enveloppes spectrales [ALLES 1980],[KAPLAN 1982]. BUXTON décrit une commande d'enrichissement du timbre. Il s'agit en fait d'enrichir le spectre en commandant l'indice de modulation d'une synthèse utilisant la modulation de fréquence. D'autres dispositifs existent : pédales, "joysticks",...

2.4.3. Geste et composition.

L'intervention du geste est présentée dans le cadre de la synthèse directe des sons comme une étape seconde, soumise à la composition préalable des sons. Le signal sonore est prédéfini et le geste est là pour apporter un complément de définition.

MATHEWS, MOORE & RISSET(1974) pensent qu'un des avantages de l'ordinateur est de se libérer des chaînes de la virtuosité mécanique. Un système tel que le GROOVE offre des responsabilités expressives à l'utilisateur sans lui demander pour autant une technique de professionnel ; il peut travailler et rectifier avec une souplesse

sans précédent certains aspects interprétatifs. RISSET(1980) ajoute : "Mettre un tel système à la disposition du public pourrait réintroduire une pratique de la musique contemporaine, combler le fossé entre l'instrumentiste amateur et une musique qui, pour l'instant, n'a pas de relation avec sa pratique".

L'ensemble des trois éléments Sequential Drum, ordinateur, synthétiseur numérique est donné comme exemple d'une nouvelle génération d'instruments permettant de s'intéresser à l'interprétation plutôt qu'au problème de réalisation technique correcte.

2.5. Dialogue homme-machine et synthèse directe des sons.

Ils sont souvent dépendant du procédé de synthèse utilisé. Le dialogue homme-machine peut s'avérer difficile si les paramètres de la synthèse ou la configuration matérielle sont peu pertinents, même pour un musicien ayant des connaissances techniques. ROLNICK(1978) expliquait que le musicien, s'il voulait se servir de toutes les possibilités musicales de la "carte 4B", avait intérêt à en comprendre le schéma fonctionnel. Des techniques de synthèse se justifient selon leurs auteurs par leurs faibles coûts en temps de calcul. Mais ceci se fait parfois au prix de la manipulation de paramètres abscons (MITSUHASHI(1982) synthétise des sons à partir d'une sinusoïde "parabolique"(distordue de 0.57% par rapport à une vraie sinusoïde)).

2.5.1. MUSIC5.

L'effort, pour aider l'utilisateur, a surtout porté sur la notion de "note" MUSIC5, la partie du langage qui correspond aux paramètres. Ceux-ci sont alors définis en utilisant la notation musicale traditionnelle et des expressions arithmétiques plutôt que par des valeurs brutes [SMITH 1973], [SCHOTTAEDT 1983], [HAYNES 1980]. Par ailleurs des points d'entrée dans le programme permettent d'y ajouter des sous-programmes personnels notamment des algorithmes compositionnels : transposition, répétition d'une séquence, contraction ou étalement des tempi, inversion d'une série de "notes". Les recherches se poursuivent dans le cadre du système CARL [MOORE 1982] pour construire dans un environnement VAX 780, Unix, une nouvelle version de MUSIC5 appelée CMUSIC, ce dans un même contexte informatique incluant traitement du signal et système en temps réel.

2.5.2. Le projet SSSP(Structured Sound Synthesis Project).

Ce projet [BUXTON 1978] recherche la mise au point d'un système le plus interactif possible. Il utilise donc les possibilités temps réel tant pour la mise au point que pour l'interprétation d'une composition. Il s'agit d'essayer de parler le langage du musicien. Les auteurs sont conscients de l'état actuel de la recherche en informatique musicale. BUXTON(1978) souligne que le timbre devrait être défini en termes perceptuels et non en termes d'acoustique. Le système s'appuie sur cinq techniques de synthèse, choisies pour leur efficacité à savoir : modulation de fréquence, VOSIM, synthèse additive, par forme d'onde fixe, par distorsion et modulation d'amplitude. Il n'a donc pas la généralité de MUSIC5.

Le langage s'appuie sur les notions de partition et d'objet. La partition est une structure hiérarchique, représentable par une grammaire dont l'unique terminal est la note. Une note est définie par un objet, une durée, une "hauteur" (en hertz), et un instant d'intervention.

Un objet peut être comparé à un instrument MUSIC5 [BUXTON 1982]. Il détermine le timbre de la note. Il se construit à partir de l'une des 5 méthodes de synthèse. Le logiciel Objed [BUXTON 1982] en permet la fabrication et la mise au point ; il utilise des paramètres et fonctions d'onde par défaut, permet l'écoute de l'objet en temps réel pour différentes hauteurs, volumes et durée, voire dans le contexte d'une partition déjà programmée.

Les logiciels de construction et manipulation de partition sont nombreux : outil graphique en notation traditionnelle, en notation style rouleau mécanique pour piano, éditeur alphanumérique. La réflexion porte désormais sur l'outil logiciel à fabriquer pour définir et modifier n'importe quel "champ" dans une partition [BUXTON 1981] : modifier une note, un passage temporel, toutes les notes ou groupes de notes ayant une ou des propriétés communes...

Cette séparation partition/objet où une note correspond à un événement perceptif fait que le SSSP ne permet guère la fabrication de timbres qui soient la collusion de plusieurs objets (au contraire des notes MUSIC5) [HAYNES 1980][BUXTON 1982]. Cette séparation est donc une limitation à deux titres :

- elle empêche le contrôle du son au niveau microscopique
- elle impose une décomposition traditionnelle au créateur.

2.5.3. Nouvelle direction.

Il n'est pas facile de tracer une frontière nette entre composition avec des sons et composition des sons. Il semble néanmoins que ces deux branches de l'informatique musicale aient du mal à se rejoindre. La première, qui vise d'entrée à l'élaboration d'organisations musicales complexes, incluant éventuellement des techniques de composition automatique, néglige certains aspects de la synthèse. La synthèse directe du son a du mal à proposer des langages interactifs sans sacrifier une part de son originalité comme le montre le système de Toronto. Peut-t'on changer les données du problème ?

RODET, BARRIERE, COINTE & POTARD(1982,1984) soulignent que leur pratique des programmes MUSIC5, MUSIC10, et CHANT les conduit à penser que les structures de haut niveau proposées par ces langages sont inadaptées pour nombre de synthèses musicales complexes. Cette équipe définit alors le projet FORME [RODET 1982,1983,1984]. FORME est un environnement logiciel qui utilise les techniques d'intelligence artificielle pour manipuler des modèles et des règles. Les modèles synthétisent des phénomènes acoustiques connus tels que voix chantée ou parlée, cordes couplées... La synthèse par règle est la méthode employée pour expérimenter et utiliser ces modèles. On cherche, pour cela, à connaître les règles d'évolution temporelle des paramètres du modèle pour différents effets connus (règle d'un crescendo par exemple). Ces règles formalisent la manière dont s'articulent les phénomènes et permettent de dépasser la simple juxtaposition de phénomènes isolés. Elles constituent une base de connaissances des sons de synthèse. RODET(1982) résume :

"La finalité de ce travail est d'extrapoler de nouveaux modèles créatifs (qui ne peuvent être trouvés ab nihilo dans l'espace des sons numériques) pour la musique à partir de modèles cognitifs élaborés dans le processus de synthèse par règles".

2.6. Psychoacoustique.

Cette discipline est considérée dès l'origine [MATHEWS 1963] comme le guide des méthodes de synthèse directe des sons. La mise au point de modèle qui permettent de savoir comment va opérer la perception auditive est particulièrement importante. Ces modèles, appelés modèles perceptuels, se construisent à l'aide du procédé d'analyse-synthèse des sons [RISSET & WESSEL 1982]. Ils permettent la conception de systèmes de synthèse plus adaptés à la perception. C'est donc, a priori, des expériences psychoacoustiques que sont susceptibles de se dégager les méthodes de synthèse par règles et les bases de nouveaux langages de synthèse. La psychoacoustique, après s'être attachée à cerner les caractéristiques d'un son isolé (cf A.2.2) cherche comment la perception organise le flux de sons.

2.6.1. Trois exemples de modifications d'enveloppe spectrale, trois perceptions différentes.

RISSET(1982) explique comment, dans une de ses pièces, "Inharmoniques"(1975), il modifie le profil temporel de l'enveloppe spectrale d'un son imitant celui d'une cloche ; le son se transforme alors en une texture fluide sans aspects percussifs. L'écoute, de synthétique (signal sonore perçu comme un tout), devient plutôt analytique (perception des différentes composantes de la texture).

GREY & MOORER(1976) analysent 16 sons d'instruments traditionnels. Ils les représentent ensuite par des fonctions linéaires par morceaux en fréquence et en amplitude (fig. 2). Ces formes simplifiées sont jugées semblables à leurs originaux. Elles suggèrent l'utilisation d'interpolations linéaires pour passer d'une forme à une autre. GREY(1975) réalise, par exemple, le passage du timbre du violoncelle à celui du cor anglais. Ce passage se fait sans discontinuité perceptible.

POTARD(1982) étudie un signal harmonique dont le spectre est en forme de cloche. En jouant sur la largeur de cette cloche, on peut avoir une gamme de perceptions diverses : un seul son ou plusieurs de hauteurs différentes. La manipulation de paramètres d'un procédé de synthèse pourrait aussi aboutir à de tels phénomènes.

2.6.2. Fusion /scission.

Une question centrale est alors de savoir quelles sont les conditions pour qu'un signal sonore soit saisi comme une "source" sonore unique. On peut rapprocher cette notion de "source" proposée par Mc ADAMS(1982) de celle d'"objet sonore" proposée par SCHAEFFER(1966). Ce ne sont pas les mêmes outils d'investigation qui sont utilisés par ces deux auteurs. Le solfège descriptif de SCHAEFFER, opératoire pour

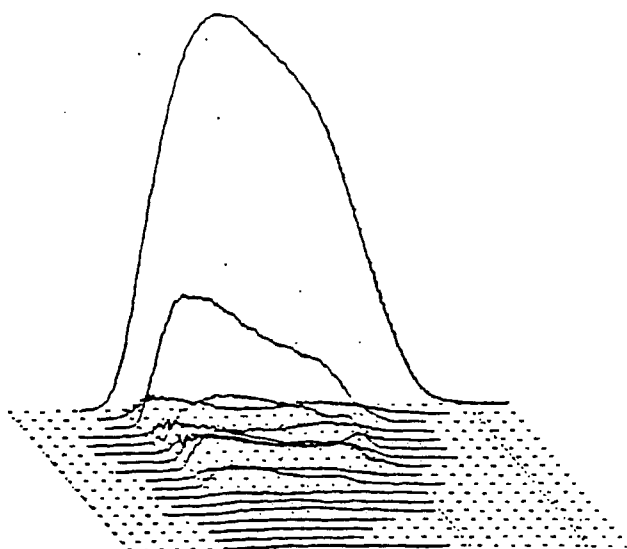


Figure 2a

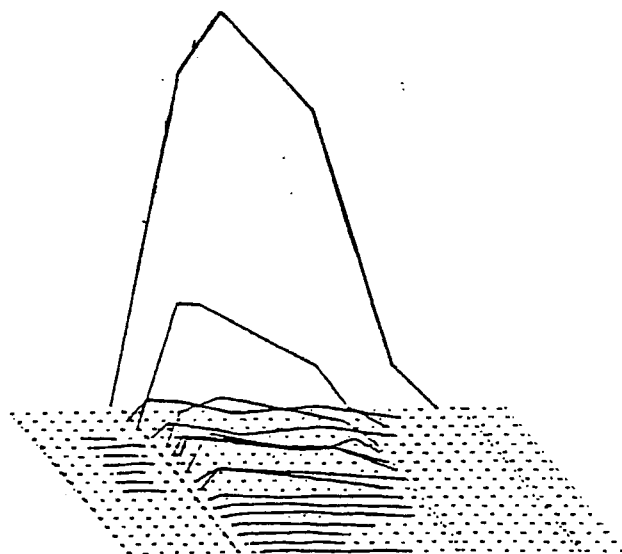


Figure 2b

Réduction à un ensemble de fonctions linéaires par morceaux de l'évolution temporelle des spectres des instruments traditionnels.

Figure 2a : Représentation tridimensionnelle amplitude-fréquence-temps des résultats de l'analyse d'un son de clarinette.
Le détail des variations de fréquence pour chaque partiel n'est pas visible sur la figure.

Figure 2b : Approximation dite "linéaire par morceaux" de la figure 2a.

[figures empruntées à GREY(1975)]

l'oreille, ne permet pas de programmer un ordinateur. Le procédé de synthèse directe des sons oblige, pour résoudre cette question, à une description physique "fine" du signal sonore.

Mc ADAMS(1982) indique trois indices qui peuvent être ou non combinés : harmonicité du signal, modulation coordonnée des composantes du signal, familiarité de l'enveloppe spectrale (structure formantique). Il souligne que des modulations sont nécessaires pour percevoir une forte fusion ; sans modulations, l'oreille tend à une écoute analytique des composantes. Mc ADAMS note par ailleurs que le critère de familiarité avec l'enveloppe spectrale peut être un processus inné ou acquis au cours d'expériences avec la source.

Il propose ensuite trois autres critères acoustiques pour expliquer le processus qui conduit à déterminer plusieurs sources sonores dans un signal : asynchronisation des débuts (des sons des sources), asynchronisation des transitoires des modulations coordonnées des différentes sources, corrélation temporelle parmi les modulations appartenant aux sources. Concernant le troisième point, Mc ADAMS explique qu'un même partiel peut appartenir à plusieurs sources ou, plus généralement, qu'une même partie d'un signal sonore peut être commune à plusieurs sources.

2.6.3. Espace des timbres.

L'analyse des 16 sons d'instruments, déjà citée en A.2.5.1, est un point de départ essentiel d'une série d'études sur l'espace des timbres. Ces 16 sons sont expérimentalement égalisés en hauteur et puissance ; seul le timbre alors les différencie. La réduction de données opérée est d'un rapport 100 environ. Ce corpus est ainsi constitué d'éléments aux propriétés acoustiques mieux définies, débarrassés d'un certain nombre d'aspects non pertinents pour l'oreille.

GREY(1975,1977) ou EHRESMAN & WESSEL(1978) appliquent des techniques d'analyse multidimensionnelle aux jugements d'auditeurs musiciens sur les différences existant entre les timbres du corpus. Ces analyses aboutissent à la construction d'espaces euclidiens. Les timbres sont alors des points de cet espace (fig. 3). Les axes de ces espaces représentent les dimensions de la notion de timbre. L'interprétation des axes est facilitée par la forme acoustique simplifiée des sons du corpus.

GREY(1975) obtient un espace tri-dimensionnel. Les deux premiers axes sont à relier à des propriétés acoustiques ; l'un représente la distribution spatiale de l'énergie, l'autre la présence de partiels de hautes fréquences et de faible amplitude dans l'attaque des sons.

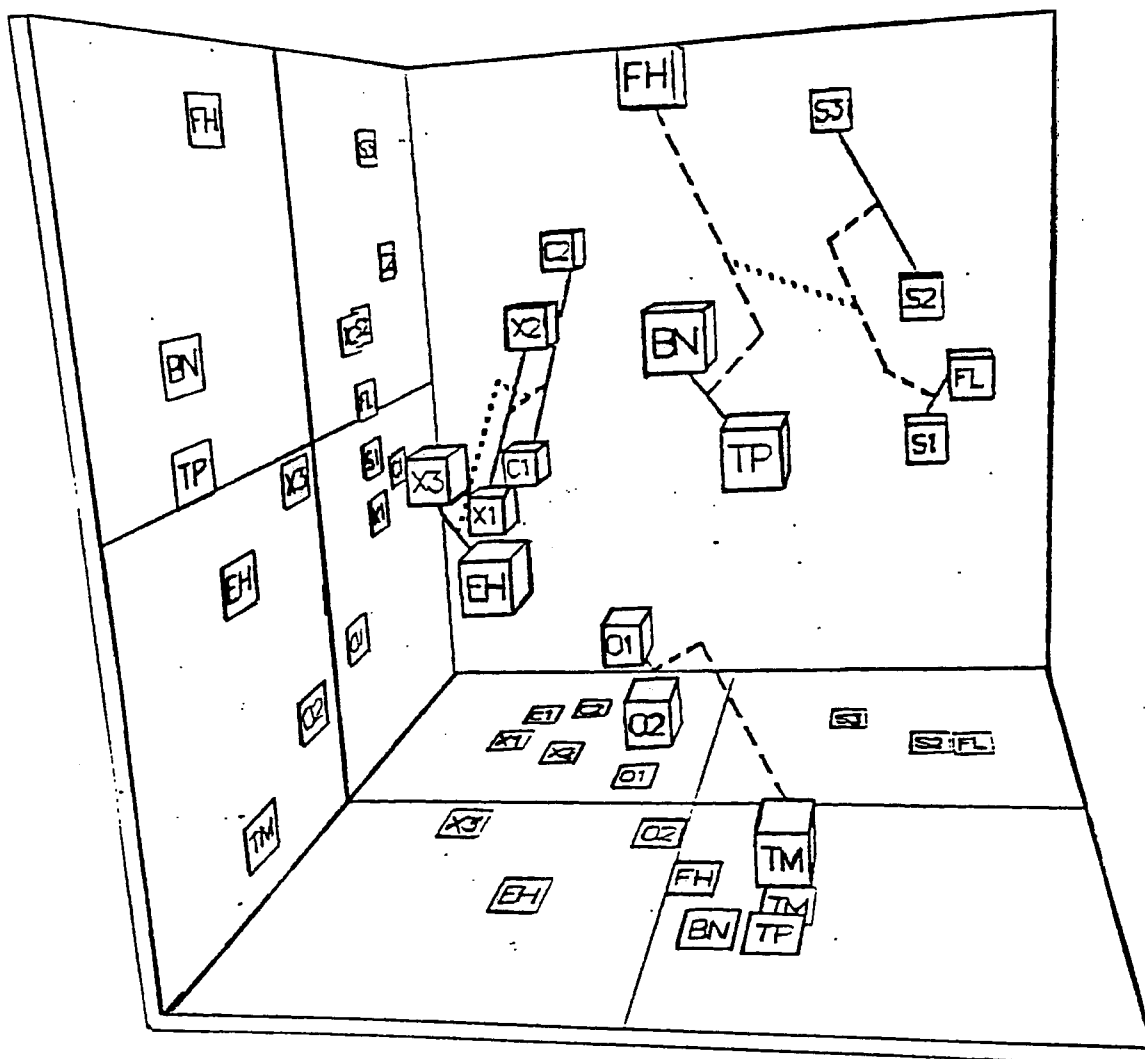


Figure 3 [d'après GREY(1975)]

Représentation dans un espace tridimensionnel des résultats d'une analyse multidimensionnelle de jugements d'auditeurs concernant les différences entre des sons obtenus après réduction de données.
 O1,O2=hautbois; C1,C2=clarinettes; X1,X2,X3=saxophones; EH=cor anglais;
 FH=cor; S1,S2,S3=cordes; TP=trompette; TM=trombone; FL=flûte;
 BN=basson.
 Les éléments des différentes classes sont reliés par des lignes pleines ou pointillées.

L'interprétation du troisième axe est plus délicate. Il peut recouvrir soit un critère physique (celui de synchronisation) soit le résultat d'une perception de "haut niveau" qui nous conduit à grouper les instruments par famille. GREY et GORDON(1978) vérifient la validité de l'espace en introduisant des modifications du corpus mais le troisième axe est alors considéré en termes acoustiques. EHRESMAN & WESSEL s'en tiennent à un espace à deux dimensions interprétées en termes d'acoustique.

Un espace des timbres [WESSEL 1979] :

- a) permet de prévoir certains comportements perceptifs. Par exemple, dans le cas de la mélodie de la figure 4, si la distance entre timbres des différentes notes est faible, il y a perception de répétition de la même ligne ascendante de trois notes. Si les timbres "x" et "o" sont éloignés par rapport à l'axe de distribution spectrale de l'énergie, il y a perception de deux lignes mélodiques descendantes (une par timbre). D'autres exemples de tels phénomènes d'organisation perceptive sont exposés par Mc ADAMS(1979).

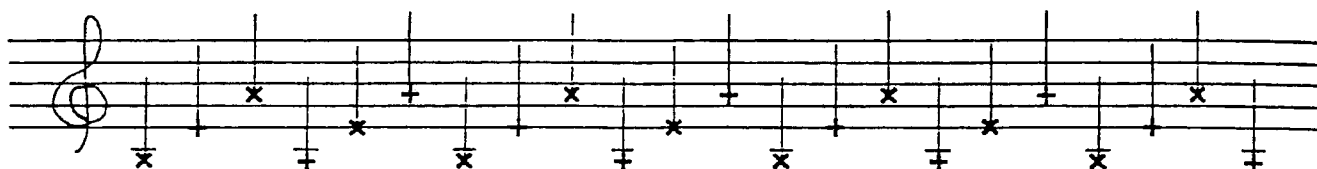


Figure 4

- b) suggère des analogies entre transitions de timbres. EHRESMAN et WESSEL testent positivement la possibilité de transposer des timbres comme on transpose une mélodie d'une hauteur à une autre.
- c) propose de nouveaux outils. WESSEL & SMITH(1977) donnent au musicien un outil informatique pour bâtir un espace de timbres à partir des sons qu'il désire. La représentation graphique de cet espace est une aide conceptuelle pour son utilisateur.

- d) Enfin, l'espace des timbres invite à construire de nouveaux systèmes de synthèse.

"Un espace des timbres bi-dimensionnel était représenté sur le terminal graphique de l'ordinateur hôte qui contrôlait la carte d'oscillateurs de DI GIUGNO(1976) à l'IRCAM. Une des dimensions de cet espace représentait la forme de la distribution de l'énergie spectrale, l'autre axe contrôlait soit le taux d'attaque, soit le degré de synchronisation parmi les différentes composantes. Les trajectoires de timbres dans cet espace se déroulaient sans à-coup et étaient perceptuellement significatives. Pour construire des outils plus sophistiqués, un langage informatique efficace pour le maniement des enveloppes est nécessaire. L'idée de base, pour un tel langage, est de fournir une structure de contrôle souple qui permette de spécifier, séquencer et combiner différentes procédures de création et de modification d'enveloppes. Ces procédures incluant des opérations telles que contraction ou extension des durées, changement de hauteur, de forme spectrale, synchronisation ou non des composantes etc. Avec de tels langages, il serait possible de lier directement les opérations sur des groupes d'enveloppes aux propriétés des représentations perceptuelles du matériau " (traduit d'après WESSEL 1979).

2.6.4. Changer la perception.

Mc ADAMS(1982) s'interroge sur la part d'innéité et d'acquis dans les mécanismes perceptifs qui décident de la présence d'une ou plusieurs sources dans un signal sonore. L'écoute ordinaire est synthétique plutôt qu'analytique (par partiels). Il paraît évident que c'est l'apprentissage de certaines règles qui conduit à attribuer un timbre unique à un instrument tel que la clarinette (ou le piano-forte) ou à fusionner les composantes inharmoniques d'une cloche. Ces règles imposent, selon Mc ADAMS, des limites à la perception ; l'écoute de musiques nouvelles devrait conduire à l'évolution de nos capacités perceptives. Il nous est possible d'étendre celles-ci, en résistant à vouloir fusionner des signaux sonores et en acceptant une écoute analytique que permet notre système auditif.

Mc ADAMS évoque enfin le travail du compositeur à partir d'un espace des hauteurs et timbres combinés (*).

"Des modifications dans les groupements d'un champ spectral complexe peuvent conduire à de riches changements perceptifs. Des myriades d'images auditives éphémères apparaîtraient et se dissiperaient les unes dans les autres.[...] En musique, nous quittons la conception de la mélodie comme une simple succession de hauteurs ou de timbres pour aller vers sa conception comme un organisme complexe et évolutif auquel vie est donnée par la perception "active" qu'exerce l'auditeur sur le spectre variant au cours du temps." (traduit d'après Mc ADAMS 1982).

L'intérêt de cette citation est d'introduire la question de la perception "active", des stratégies propres à l'auditeur ; (le compositeur est, à un moment ou un autre, un cas particulier d'auditeur). Changer la perception pose implicitement la question de l'élaboration, donc de l'apprentissage, bref de l'ontogénèse de ces stratégies. L'écoute seule est-elle responsable de leurs constitutions et de leurs évolutions? La perception est un phénomène complexe et cette question n'a pas de réponse évidente.

(*) VARESE(1983 p91-92) a écrit dès 1936 des pages très prégnantes sur ce sujet.

3. LA PERCEPTION.

3.1. La perception, phénomène actif.

Le fonctionnement du système de perception humain a peu à voir avec un fonctionnement en récepteur pur (récepteur passif). La perception, en particulier l'audition, est essentiellement un processus actif. Par processus actif, il faut entendre que l'être humain émet des hypothèses sur les signaux qu'il perçoit, procède de façon synthétique, tient compte du contexte.

"on sait d'après les travaux de Richardeau, Zachrisson, Remond sur la lecture des textes imprimés que, dans la lecture cursive, le nombre de points de fixation de l'oeil ne dépasse pas deux à trois par ligne et qu'il est matériellement impossible à l'oeil d'appréhender la forme de chaque lettre".[MOLES 1972]

Les phénomènes d'illusions visuelles, - dessins en perspective (pour simuler la troisième dimension), illusions résultant de l'action du fond sur la figure (voir par exemple les travaux des "gestaltistes" ou de Piaget cités par FRANCES (1963 p24 et p41)) - ou d'illusions acoustiques [WESSEL & RISSET 1979] sont des preuves particulièrement significatives de la complexité de la perception.

"Dans l'enregistrement d'une phrase, WARREN(1970) a remplacé un phonème par un bruit de toux de même durée. Les auditeurs ont cependant déclaré entendre clairement le phonème absent ; de plus, informés qu'un phonème manquait, ils ne pouvaient dire lequel et, quand on leur a demandé la position du bruit de toux, ils ont, en général, indiqué des positions incorrectes, à plusieurs phonèmes de distance... Ces effets de restitution perceptive, pour la musique aussi bien que pour la parole, suggèrent que l'audition est un processus actif, dans lequel l'expérience mentale est construite à partir de données sensorielles souvent incomplètes ou entachées de bruit." [WESSEL & RISSET 1979]

Dans une étude plus ancienne, RISSET(1968) cite de nombreux exemples qui montrent que la hauteur perçue d'un son ne résulte pas de la donnée brute des sens. Elle est un attribut déduit des données sensorielles par un processus actif.

RISSET(1968), MOLES(1958) ou SCHAEFFER(1966) développent, par ailleurs, le fait que la perception opère à plusieurs niveaux.

"Dans le cas le plus général, l'individu sera confronté à un ensemble de stimuli sans qu'il y ait au départ de classification imposée : il décomposera le tout en parties potentielles, il jugera les rapports que ces parties ont entre elles, leur organisation dans le tout (cela à plusieurs niveaux imbriqués) pour aboutir à un classement et éventuellement à une reconnaissance. Les "traits distinctifs" éventuels ne sont pas donnés a priori : ils sont extraits, dégagés par des opérations perceptives qui dépendent de l'expérience antérieure du sujet. Or cette expérience est très riche : la perception tient compte "en parallèle" d'un nombre considérable de données, et elle opère par une série de tests d'hypothèse, procédant par inférence à partir des indices congruents et éliminant les indices non congruents... Il semble que l'évolution ontogénique de l'individu ait constitué, grâce aux possibilités associatives de la mémoire, une sorte d'image cérébrale, de représentation interne du monde extérieur, sans cesse modifiée et "remise à jour" par la perception ;" [RISSET 1968].

3.2. La perception du musicien.

L'écoute, la pratique et la composition de la musique supposent une évolution particulière, des apprentissages perceptifs spécialisés. Le système périphérique auditif conditionne certes l'écoute mais son fonctionnement n'est pas la clé pour comprendre l'acte d'écoute, en particulier l'acte d'écoute musicale.

FRANCES(1958) montre pour chacune des expériences qu'il relate, l'impact de la culture du musicien sur ses réponses à des tests psycho-perceptifs. Ces tests concernent des phénomènes de "haut niveau" fortement liés à un système esthétique (repérage de thème, perception d'une fugue...). Ils n'en démontrent pas moins les prouesses d'une perception éduquée. Tout récemment, NILSON et SUNDBERG(1983) constatent l'habileté d'étudiants de conservatoire de musique à juger de l'état dépressif d'une voix en écoutant l'évolution de sa fréquence fondamentale. Ce type de performance, non lié à un système esthétique musical particulier, montre bien un entraînement particulier de "l'oreille musicale". SCHAEFFER(1966) consacre de nombreuses pages du "Traité Des Objets Musicaux" aux intentions d'écoute, à la polyvalence de l'écoute musicale des signaux sonores.

Leur entraînement conditionne le rythme biologique alpha des sujets musiciens (FRANCES 1958 p154) et la répartition de leurs activités entre les deux hémisphères du cerveau. BEVER & CHIARELLO(1974) établissent que des sujets sans éducation musicale perçoivent mieux les mélodies avec l'oreille gauche, mais qu'au cours de l'éducation musicale, l'oreille droite devient la meilleure. Les expériences de CHARBONNEAU & RISSET(1975) sur la perception des hauteurs corroborent ce fait. Le cortex gauche contient d'ailleurs les centres de l'activité manuelle et du langage (cf FRANCES(1958) citant Fulton p147).

3.3. La perception, phénomène multisensoriel.

En ce qui concerne l'apprentissage du musicien, il apparaît évident que ses connaissances ne proviennent pas que d'un exercice de son oreille. Il est aisé de constater qu'une expérience instrumentale, même d'amateur peut guider l'écoute. Avoir vu la disposition d'un orchestre, saisi l'unité entre pizzicati et notes tenues à l'archet sur des instruments à cordes..., permet ensuite une meilleure écoute des enregistrements.

FRANCES(1963 p72) cite une expérience de Salomon et Postman. Des listes de mots sans signification sont données à lire à deux groupes de sujets. "Les uns sont engagés, au cours de ces lectures, à joindre l'articulation silencieuse à la vision. Puis on montre ces mots à tous les sujets dans des présentations tachistoscopiques. On constate alors que l'apprentissage double confère un avantage significatif dans la tâche perceptive."

WESSEL & RISSET(1979) citent dans leur article consacré aux illusions auditives une expérience de McGurk et McDonald. "Si on présente un film sonore dans lequel le son enregistré "ba-ba" est synchronisé avec l'image du visage d'une personne prononçant "ga-ga", la grande majorité des sujets spectateurs-auditeurs (anglais) affirme entendre "da-da"! Il suffit de fermer les yeux pour entendre correctement "ba-ba".

Comme le souligne RISSET(1977) : "La fonction auditive paraît constamment effectuer de véritables tests d'hypothèse sur le monde extérieur : ces tests, modelés par l'évolution phylogénétique et ontogénétique, sont bien sûr sans cesse confrontés aux données des autres canaux sensoriels avant que n'émerge une décision, une perception, une réponse".

3.4. Remarque concernant la psychoacoustique.

La perception musicale est donc un phénomène fort complexe et les sciences psychoacoustiques sont encore loin d'en dévoiler tous les aspects, même si le procédé de synthèse directe des sons leurs ont fait faire d'énormes progrès.

3.4.1. Limite de la notion d'espace des timbres.

- a) Un espace des timbres parfaitement continu n'est guère envisageable, comme le soulignent GREY(1975) et RISSET & WESSEL(1982) en le citant.
- b) Par ailleurs, indépendamment des problèmes soulevés par les faits exposés ci-dessus (3.1, 3.2, 3.3), "l'espace des timbres" est encore une notion monophonique.
- c) Enfin, "l'espace des timbres" mélange ce qui, dans l'expérience traditionnelle est dû d'une part à l'instrument, d'autre part à l'interprète :

GREY & MOORER(1977) qualifient les différences perceptibles entre un son original et son homologue synthétique de nuance d'articulation ou de style de jeu.

CHARBONNEAU(1979) poursuivant ce travail sur la réduction de données explique : "...bien que les timbres simplifiés ne soient pas toujours absolument identiques aux timbres de référence, ils en sont proches d'une manière qui n'était guère prévisible, ce qui démontre que la part la plus significative de l'information a été conservée". L'espace des timbres n'en est pas moins dépendant des instrumentistes qui ont donné naissance aux sons qui le constituent (voir le problème de CHARBONNEAU(1979) avec la réduction du son de flûte traversière).

Si l'information concernant le timbre est conservée, il n'en est pas de même de l'information musicale. En effet, les aspects d'interprétation (on pense par exemple aux effets d'articulation dans les instruments à vent), dont l'intérêt musical semble peu niabie, ne sont pas pris en compte. Ils ne sont pas modélisés dans "l'espace des timbres". GREY(1975 p109) préconisait une étude psychoacoustiques de ces aspects interprétatifs mais cette étude n'a, à notre connaissance, pas été faite.

3.4.2. Le jugement des auditeurs.

Pour toute expérience psychoacoustique, les descriptions phénoménologiques obtenues à partir des jugements d'auditeurs musiciens sont conditionnées par l'éducation perceptive de ces auditeurs. Or si on ignore comment cette culture se construit, comment se développent les stratégies perceptives, quels sont les facteurs de leur évolution, la portée de ces jugements est à relativiser.

De la même façon qu'un occidental "naturalise" en terme de gamme chromatique les intervalles d'un mode oriental [RISSET(1977), FRANCES(1958 p48-50), FRANCES(1963 pl17)] il est possible qu'un auditeur tende à naturaliser les timbres inouïs (au sens de jamais ouïs), c'est-à-dire les rapprocher arbitrairement de son expérience. Ce comportement existait déjà pour les timbres d'instruments traditionnels. RISSET(1968) remarque que "le saxophone fut décrit à ses débuts comme mauvaise clarinette basse métissée de basson : on reconnut ensuite qu'il avait son timbre propre, digne d'enrichir la palette orchestrale" Rien ne permet d'affirmer que cette reconnaissance soit due à la seule écoute du son du saxophone.

3.5. La représentation.

PIAGET & INHELDER(1947) étudient l'ontogénèse de la représentation de l'espace chez l'enfant. Cette étude illustre le fait que la perception est un phénomène où les actions multisensorielles jouent un rôle essentiel. Cette multisensorialité est constitutive de la représentation de l'espace. Si cette étude ne saurait être directement transposable à la représentation mentale du monde des sons chez l'adulte ou l'enfant, elle interroge quant à la différence de représentation entre les phénomènes sonores naturels et les sons obtenus par synthèse directe. En effet, les sons naturels sont aussi connus par leur cause (l'homme peut même être cause des sons par l'intermédiaire d'instruments et avoir ainsi une perception tactile et kinesthésique, visuelle et auditive) ; pour les sons obtenus par synthèse directe, seule la perception auditive entre en jeu.

"Dès les rapports élémentaires d'ordre (objets à aligner dans les deux sens), d'enveloppements (noeuds), ou les rapports projectifs (perspectives à reconstituer, ombres à projeter, faisceaux à sectionner, surfaces à rabattre, etc.), affines (losange à étirer), jusqu'aux similitudes et aux ensembles à coordonner en plans, toutes les formes d'intuition spatiale que nous avons étudiées reposent sur des actions : action de placer de proche en proche (voisinage) ou en une succession définie (ordre), d'envelopper, de serrer et de desserrer, de changer de point de vue, de couper, de rabattre, de plier et de déplier, d'agrandir ou de rapetisser, etc.[...] Un noeud un peu desserré n'est vu ni conçu comme homéomorphe à un noeud un peu plus serré, avant que le sujet n'ait tiré sur la ficelle...(p528)"

"L'intuition de l'espace n'est pas une lecture des propriétés des objets, mais bien, dès le début, une action exercée sur eux ; et c'est parce que cette action enrichit la réalité physique, au lieu d'en extraire sans plus des structures toutes formées, qu'elle parvient à la dépasser peu à peu, jusqu'à constituer des schémas opératoires susceptibles d'être formalisés et de fonctionner déductivement par eux-mêmes. De l'action sensori-motrice élémentaire à l'opération formelle, l'histoire de l'intuition géométrique est donc celle d'une activité proprement dite, d'abord liée à l'objet auquel elle s'accommode, mais en l'assimilant à son propre fonctionnement jusqu'à la transformer autant que la géométrie a transformé la physique"(p523).

Les actions s'intériorisent alors en opérations concrètes, constituant un système qualifié d'infra-logique, intermédiaire entre le niveau intuitif élémentaire et les opérations formelles source des propositions hypothético-déductives. "Ce terme d'infra-logique ne signifie nullement que ces opérations soient inférieures en rigueur aux opérations logico-arithmétiques, mais simplement qu'elles sont formatrices de la notion de l'objet comme tel...(p525)".

Le raisonnement géométrique parvient ensuite à se libérer de l'objet pour devenir de plus en plus déductif. La représentation spatiale est alors une action intériorisée ; elle ne parvient à prévoir un résultat qu'en devenant elle-même active. "A cet égard, ordonner en pensée n'est pas seulement imaginer une suite d'objets déjà ordonnés, ni même simplement se représenter en image l'action de les ordonner : c'est ordonner cette suite aussi réellement et activement que s'il s'agissait d'une action matérielle, mais en exécutant intérieurement cette action au moyen d'objets symbolisés" (p530).

4. L'ordinateur comme "outil de création",
Nécessité d'une prise en compte de l'expérience instrumentale.

4.1. Introduction.

Créer suppose une volonté d'organisation d'objets. L'acte créatif fait alors appel à tous les aspects des objets, en particulier, leurs valeurs symboliques. L'étude de PIAGET & INHELDER montre ces valeurs dépendantes d'une perception active et globale. Par perception globale, on entend une relation à l'objet complète, mettant en jeu l'ensemble des moyens sensoriels par lesquels l'homme peut appréhender l'objet.

Trois canaux d'information perceptives sont alors principalement à considérer, qui concernent le geste, l'ouïe, la vue. Il faut ici souligner la particularité du canal gestuel : son fonctionnement bilatéral. Le geste, c'est-à-dire une action motrice, un investissement énergétique sur un objet, est indissociable d'une perception liée à l'action elle-même (principe de l'action et de la réaction) : la perception tactile et kinesthésique de l'objet manipulé. L'ensemble des actions gestuelles et des perceptions multisensorielles constitue le rapport instrumental à l'objet ; les connaissances susceptibles d'être ainsi acquises constituent l'expérience instrumentale.

Ce n'est pas cette relation qui existe entre l'être humain et les objets représentés dans l'ordinateur lorsque l'on considère les procédés classiques de synthèse d'images animées ou le procédé de synthèse directe des sons. C'est précisément ce type de relation complète que le projet auquel se rattache ce travail de thèse essaye de mettre en oeuvre. Prenant en exemple deux secteurs particuliers de la création, l'image animée et le son, nous allons justifier de façon plus détaillée la nécessité de cette relation.

4.2. Remarque concernant la synthèse d'images animées par ordinateur.

Dans les procédés de synthèse classique, seul l'oeil est admis à juger, au détriment des autres canaux sensoriels ; cela rend d'entrée l'image abstraite, sans relation complète avec le sensible. Cet aspect est particulièrement critique dans le cas d'une séquence formée d'images où des objets sont mis en mouvement. Son appropriation, sa représentation mentale ne peuvent se faire que par assimilation aux images connues. Seules des possibilités de manipuler une image synthétique (comme on manipule par exemple un noeud) lui permettraient d'acquérir une prégnance propre, permettant ensuite son utilisation à de nouvelles fins esthétiques. On se rapportera à la thèse de LUCIANI(1985) pour une justification théorique détaillée.

La suite de l'exposé se cantonne au domaine du son mais les remarques qui y sont faites ont une portée plus générale.

4.3. Limite de la synthèse acoustique comme moyen de création musicale.

Le terme de "synthèse acoustique" qualifie les démarches qui découlent du procédé de synthèse directe des sons. Ces démarches ont comme objet central le signal sonore, qu'elles définissent en terme d'acoustique ou en s'appuyant sur des modèles psychoacoustiques (cf le constat de SCHAEFFER cité en A.1.1).

4.3.1. L'ordinateur moyen de représentation.

CADOZ(1979) explique que l'ordinateur peut être considéré, de façon très générale, comme un moyen de représentation d'objets. Par cette représentation, c'est une nouvelle connaissance des objets que l'on acquiert. D'autre part, le système conserve une liberté par rapport au domaine de référence. Ce deuxième point est fondamental et fait tout l'intérêt d'un moyen de représentation, car, c'est de là que naissent les possibilités authentiques de création.

4.3.2. La synthèse acoustique est une démarche du compositeur.

Par le biais de la synthèse directe des sons, l'utilisateur construit une partition qui est une description acoustique exacte, une représentation du son. Utilisé avec un programme tel que MUSIC5, l'ordinateur est un moyen de représentation de l'espace sonore ; il est apte à simuler l'espace sonore naturel comme le montrent les études sur l'imitation des timbres instrumentaux. Les progrès de la psychoacoustique, la constitution d'"espace des timbres" montrent respectivement le progrès des connaissances et le type de domaine de liberté ainsi acquis. Ouvrant directement au niveau du résultat sonore, les démarches qui traitent de la synthèse directe des sons sont fondamentalement des attitudes de compositeur. Elles "se rattachent à une même conception implicite de la création musicale qui privilégie le mode conceptuel abstrait comme mode de création quasi exclusif (CADOZ 1984)".

L'objet sonore n'est pas l'objet d'une perception globale. La synthèse directe des sons fait, a priori, abstraction de la perception gestuelle et visuelle ; l'investissement énergétique de l'opérateur n'a pas de sens bien défini quand il manipule des "accès" contrôlant des paramètres tels que hauteur, amplitude ou spectre. Des trois activités traditionnelles liées à la création musicale, celles du luthier, de l'instrumentiste et du compositeur, ne subsiste que la dernière (CADOZ 1979)".

4.3.3. L'expérience du compositeur.

"Il est indéniable que l'expérience du compositeur, dans la situation traditionnelle, où il fait appel à un matériau issu d'instruments réels, n'a rien, au départ d'acousmatique. Le compositeur traditionnel a une connaissance instrumentale des sons, indissociable de la genèse de ses facultés mêmes d'abstraction, de conception de création ..." [CADOZ 1981].

Ce que nous appelons connaissance instrumentale est ce qui résulte d'expériences, qui, sans s'identifier à connaissance d'instrumentiste, n'en sont pas moins fondamentales. CADOZ (1981) développe : "C'est par exemple la simple observation d'instrumentistes en action, mais beaucoup plus simplement encore, l'expérience quotidienne, ceci depuis quasiment la naissance, des corps sonores, c'est-à-dire d'objets simples ou complexes de l'environnement, dont la propriété privilégiée est de répondre acoustiquement à des sollicitations physiques actives du sujet..."

Or précisément, lorsque le compositeur est placé devant une machine susceptible de lui donner à entendre des événements sonores inouïs, c'est cette expérience qui fait défaut.

Les "chances de survie" de l'événement sonore inouï en tant que signe musical sont alors liées à une seule ligne : celle qui, par la seule écoute acousmatique, peut le rattacher à un événement antérieurement connu.

Nous pensons que cette ligne est mince en regard de la variété potentielle des objets sonores que la génération numérique permet d'envisager."

La reconstitution autour de l'outil informatique des conditions de l'expérience instrumentale semble donc essentielle.

4.3.4. La fonction symbolique des sons.

"La fonction symbolique des sons n'est pas une donnée en soi mais le résultat d'un rapport expérimental dont les racines, pour l'individu et pour le collectif sont à rechercher jusqu'au niveau des expériences sensorielles les plus élémentaires. L'analyse et la synthèse acoustiques sont des moyens de maîtriser la constitution objective du son mais pas son contenu symbolique [CADOZ 1981]." "Or si l'événement sonore acquiert, après une longue pratique, une certaine autonomie en tant que signe, il reste en partie signifiant de ces références causales" [CADOZ 1979 p38].

Ces phrases font écho à l'étude de PIAGET & INHELDER (cf A.3.5).

DELALANDE(1982) postule un rapport plus direct entre expérience instrumentale et perception : "L'instrumentiste a une perception à la fois sonore, kinesthésique et tactile, l'auditeur, lui, a une perception sonore qui prend une signification kinesthésique et tactile... Nous voyons donc la production musicale (invention et jeu instrumental confondus) répondre non pas à une mais trois motivations profondes : la jouissance de la motricité productrice du son, le dépassement de cette origine par une valeur symbolique, le plaisir de soumettre l'organisation formelle à une règle du jeu". La valeur accordée au geste musical par DELALANDE est peut-être trop grande et cette vision trop ludique.

4.4. L'ordinateur moyen de représentation de l'univers instrumental.

On abandonne alors l'ordinateur comme moyen de représentation du signal sonore, pour l'aborder comme moyen de représentation de sa causalité. L'objet sonore est alors considéré comme résultat, dépendant d'un objet accessible, lui, à l'expérience instrumentale. "Ce qui signifie en d'autres termes que nous rejetons l'objet sonore comme objet d'étude, pour nous attacher, quitte à limiter le champ d'événements sonores à un domaine plus restreint, à l'instrument dans toutes ses déterminations, c'est-à-dire celles qui posent toutes les conditions de son expérimentation active et sensorielle [CADOZ 1981]".

4.5. L'outil de création.

Un des objectifs du projet est d'explicitier un certain nombre de processus d'élaboration des systèmes de la création artistique. Par hypothèse, ceux-ci sont supposés dépendants de l'outil de création qui les supporte. Un outil de création est à considérer comme bien plus qu'un outil de production des objets et structures esthétiques (images ou sons) ; c'est avant tout un lieu d'expérimentation de ces objets et structures. Il est à la base des découvertes et des processus d'apprentissage. Il n'est pas le simple média d'une pensée esthétique pré-élaborée mais le support même de cette élaboration(*). Dans le champ des techniques informatiques, l'outil de création possède de plus des possibilités de mémorisation objective et c'est là que la situation est radicalement nouvelle. Les partitions et les instruments traditionnels mémorisent partiellement la musique. Un magnétophone ne mémorise que le signal sonore. L'ordinateur permet de mémoriser jusqu'à la cause du son.

(*) Dans un autre ordre d'idée, le retour à l'instrumentarium d'époque pour l'exécution de la musique occidentale des 16-18ème siècles métamorphose l'interprétation, l'écoute et la compréhension de cette musique. L'adéquation entre instruments, technique instrumentale et écriture musicale (autrement dit une certaine cohésion du dipôle création/outil de création) y a un caractère d'évidence pour qui pratique ainsi la musique ancienne [HARNONCOURT 1984].

Il nous semble que les systèmes basés sur le procédé de synthèse directe des sons ne sont pas des outils de création complets. Ils éludent l'expérience instrumentale, présupposent que l'utilisateur est, d'entrée, apte à être compositeur.

Construire un outil de création complet à l'aide de l'ordinateur conduit alors à définir les supports matériels et logiciels nécessaires pour prendre en compte les deux aspects que sont, d'une part l'expérience instrumentale (au sens de l'expérience multisensorielle avec les objets représentés dans l'ordinateur) et, d'autre part, l'activité conceptuelle construite sur cette expérience. "La mémorisation des fonctions gestuelles permet d'aborder les aspects compositionnels. Une direction d'investigation nous paraît séduisante : celle d'une recherche de continuité de processus entre la phase instrumentale et la phase compositionnelle [CADOZ 1981]".

5. CONCLUSION.

MATHEWS(1974) ou RISSET(1983b) citent VARESE(1983) déclarant en 1917 : "...je rêve les instruments obéissant à la pensée - et qui avec l'apport d'une floraison de timbres insoupçonnés, se prêtent aux combinaisons qu'il me plaira de leur imposer et se plient à l'exigence de mon rythme intérieur". VARESE(1983) ajoutait, en 1936 : "Je suis sûr que le jour viendra où le compositeur, après avoir réalisé graphiquement sa partition, la verra placée automatiquement dans une machine qui en transmettra fidèlement le contenu musical à l'auditeur" ; et en 1948 : "L'interprète disparaîtra, tout comme le conteur d'histoires en littérature après l'invention de l'imprimerie". Au-delà de cette assimilation un peu rapide entre les codes musicaux et le langage, il importe de constater ici la négation de l'expérience instrumentale telle que nous l'avons définie. DUFOURT(1977) développant que " la musique occidentale du vingtième siècle est un art d'écriture pur, ou BRANCHI(1980) affirmant que "le dépassement de la conception instrumentale de la musique constitue le premier pas vers une réelle évolution de la pensée musicale" abondent dans le même sens que VARESE.

Les techniques radiophoniques et d'enregistrement sonore puis leur conséquence "naturelle", à savoir une écoute acousmatique des sons, viennent conforter cette idée que l'expérience instrumentale est une étape accessoire pour l'accès au "musical". SCHAEFFER(1966 p98) explique : "Telle est la suggestion de l'acousmatique, nier l'instrument et le conditionnement culturel, mettre face à nous le sonore et son possible musical". Les démarches expérimentales (celle de la musique concrète ou des premiers programmes MUSIC5) avaient leur sens dans leur contexte de moyens technologiques (magnétophone, temps différé). Mais rien ne permet l'identification de la musique aux actes d'écriture et d'écoute seuls.

L'apparition des systèmes temps-réel, permise grâce aux progrès technologiques ne conduit pas, dans le cadre de la synthèse directe des sons, à une réelle prise en compte de l'expérience instrumentale. La fonction gestuelle y est souvent introduite de façon opportuniste, sans remise en cause des principes initiaux. Il peut en résulter certaines incohérences rendant difficiles la fabrication de dispositifs et de dialogues homme-machine réellement satisfaisants pour les utilisateurs.

Or cette prise en compte est essentielle. L'instrumentiste, le compositeur et l'auditeur ont des perceptions qui prennent en partie racine dans leurs expériences et leurs connaissances instrumentales (au sens défini en A.4.3.3). L'organisation formelle des sons qui s'appuie sur leurs valeurs symboliques, dépassent l'expérience instrumentale. La constitution autour de l'ordinateur, d'un contexte matériel et logiciel satisfaisant conjointement aux conditions de l'expérience instrumentale et de la composition semble donc nécessaire. C'est dans une première approche de construction d'un "outil de création" (au sens défini en A.4.5) que se situe le travail pratique exposé dans la deuxième partie de cette thèse.

Au terme de cet historique nécessairement incomplet, on espère cependant avoir montré comment la musique (et par extension les phénomènes artistiques) pouvait, grâce aux techniques de mémorisation objectives, être observée. La recherche musicale devrait contribuer aux progrès de l'heuristique de la création, c'est-à-dire dégager et formuler certains processus de la recherche et de la découverte dans le domaine créatif. Cette recherche vise à étendre les outils matériels et conceptuels de la création musicale en interaction avec les possibilités et le développement de l'informatique. Pour nous, cette recherche passe par l'observation de l'articulation création/outil de création, où l'ensemble des manifestations de la vie sensorielle sont soumises au dialogue homme-machine.

DEUXIEME PARTIE

SYSTEME POUR LA SYNTHESE DES SONS
PAR SIMULATION DES MECANISMES INSTRUMENTAUX
EN TEMPS-REEL

1. INTRODUCTION.

Ce système, c'est-à-dire un ensemble cohérent d'appareils matériels et logiciels, est une ébauche d'"outil de création", lieu de l'expérience instrumentale et de l'activité compositionnelle (cf A.4.5). Chacun des éléments qui le composent est une réponse concrète simplifiée à différents problèmes techniques soulevés par la notion d'outil de création. L'ensemble est à considérer comme une maquette, un modèle réduit d'outil de création.

Réaliser un tel outil suppose, en particulier, la mise en oeuvre des conditions de l'expérience instrumentale (cf A.4.1). Dans le cadre informatique, l'instrument est alors un objet multisensoriel où sont en cause trois canaux essentiels : canal acoustique, visuel et gestuel ; ce dernier étant à la fois émetteur et récepteur. L'ordinateur n'est donc plus utilisé comme moyen de synthèse directe du signal sonore mais comme moyen de simulation d'un univers instrumental.

Du point de vue matériel, représenter cet univers implique, en particulier, l'existence d'un ensemble de transducteurs. Ceux-ci ont pour fonction d'établir la correspondance entre les événements du domaine sensoriel (geste, son, image) et les signaux numériques. Il faut, d'autre part, disposer d'un ensemble informatique adéquat assurant les traitements et la génération des signaux numériques (convertisseur analogique-numérique, convertisseur numérique analogique, processeur rapide pour le calcul des échantillons sonores, processeur pour le calcul des échantillons visuels...).

Le projet CORDIS vise à définir et construire un outil de création sonore. CORDIS, en tant que système conceptuel, est un ensemble structuré de choses abstraites déduites de la notion d'outil de création. Le système CORDIS est indépendant des diverses réalisations auxquelles il a donné naissance. Les premières réalisations ont aidé à une meilleure définition du système, à le dégager le plus possible des choix spécifiques de méthodes ou de réalisation. Le système CORDIS est décrit ci-dessous.

Les différentes réalisations matérielles spécifiques et une configuration matérielle qui en découlent, enfin, un langage puis un logiciel adapté à cette configuration et aux principes de CORDIS seront successivement présentés.

Cet ensemble constitue la maquette CORDIS, premier système de synthèse des sons par simulation des mécanismes instrumentaux fonctionnant en temps-réel.

2. LE SYSTEME CORDIS.

2.1. Les activités de création.

CORDIS pose qu'un outil de création doit permettre trois sortes d'activités :

- la construction des instruments,
- le jeu ou expérience instrumentale, qui est l'activité concrète où se correspondent en temps réel, action gestuelle et perceptions sonore, visuelle et gestuelle,
- la composition, qui est l'activité abstraite visant à structurer les matériaux élaborés dans les deux étapes précédentes.

2.2. Les mécanismes instrumentaux.

Introduction

Quatre points distincts mais non forcément indépendants sont à considérer pour être en mesure de construire des instruments à l'aide de l'ordinateur :

- la typologie des mécanismes instrumentaux,
- la modélisation des mécanismes instrumentaux,
- la traduction de cette modélisation en algorithmes de calcul,
- la constitution d'un langage permettant par la description de l'instrument selon ses fonctions mécaniques, la mise en oeuvre du calcul.

Typologie des mécanismes instrumentaux

Comme pour la typologie du geste, esquissée ci-après, les traits caractéristiques donnés ci-dessous constituent des hypothèses de recherche. Le but n'est pas de faire une simulation réaliste de l'instrument (c'est-à-dire se rapprocher de ce qu'est réellement un instrument traditionnel) mais de faire une simulation réduite et suffisante de ses comportements sensibles.

Un instrument est considéré comme décomposable en trois éléments :

- "la structure vibrante dont les comportements mécaniques sont essentiellement acoustiques,
- la structure excitatrice, ou excitateur, dont les comportements mécaniques sont lents et dont la fonction est de transformer le geste instrumental en excitation de la structure vibrante,
- la jonction entre l'excitateur et la structure vibrante, qui détermine la manière dont l'énergie mécanique est transmise de l'excitateur à la structure vibrante [CADOZ 1983]."

"Donnons simplement pour nous situer, quelques exemples d'excitateurs : pour les instruments à cordes : le mécanisme du piano, l'archet, le plectre, le mécanisme du clavecin, etc. Pour les instruments à vents : le flux d'air canalisé dans les embouchures de formes diverses... Pour les instruments à percussion : les baguettes et mailloches, etc [CADOZ 1981]".

Les choix de modélisation de ces éléments, leur traduction en algorithmes, le langage de construction de l'instrument du système CORDIS sont des choix spécifiques dépendant, en partie, du type de matériel et de logiciel utilisé pour la réalisation du système CORDIS.

2.3. Le geste instrumental.

2.3.1. Typologie du geste instrumental.

Une recherche théorique doit permettre la définition d'une typologie du geste instrumental, afin de sérier l'ensemble des problèmes. Cette recherche reste, dans notre cas, à approfondir ; les premiers éléments de typologie dégagés [FLORENS 1978, CADOZ 1981, FLORENS 1984] constituent des hypothèses de travail. Celles-ci permettent une approche du problème puis la déduction de dispositifs simplifiés voire réalisables. Ces dispositifs sont, en retour, un moyen d'investigation de l'espace des gestes instrumentaux, susceptibles de remettre en cause certaines hypothèses de départ.

Deux séries de critères sont proposées ; les premiers concernent la relation geste-instrument (fonction du geste), les seconds les aspects ergonomiques du geste (nature du geste).

Par simple observation du jeu instrumental, on peut définir trois catégories de gestes :

- le geste d'excitation, qui est celui par lequel l'instrumentiste communique à l'instrument l'énergie qui se transformera en énergie vibratoire,
- le geste de modulation où l'énergie mise en jeu n'est pas convertie en énergie sonore (par exemple le déplacement des doigts le long d'une corde de trompe marine, de violon..., modification de la raideur d'une corde...),
- "enfin, dans de nombreux cas, l'instrument se présente comme un objet faisant intervenir simultanément plusieurs variétés du même dispositif, plus ou moins corrélées entre elles. La sélection d'une ou plusieurs de ces variétés dans une même action instrumentale se fait au travers de la composante du geste que l'on peut appeler "Geste de Sélection" [FLORENS 1984]". Un organiste sélectionne un jeu de tuyaux, une ou des touches de son clavier, des pédales....

Pour la deuxième série de critères, FLORENS(1984) distingue :

- "L'amplitude(ampleur) du geste : Dans les situations instrumentales connues et habituelles, le geste de l'instrumentiste peut se développer dans un espace aux dimensions du corps lui-même, ou au contraire, dans un espace très restreint, s'il ne s'agit que de mouvements des doigts, par exemple.
- La direction : Actions essentiellement frontales, verticales ou latérales
- Saisie ou non saisie d'objets : corde pincée manuellement ou avec un plectre, percussion d'une touche, ou percussion d'une membrane avec une baguette, etc."

2.3.2. Geste et transducteurs.

Si la technologie des transducteurs acoustiques (les haut-parleurs) et des transducteurs visuels (l'écran cathodique) peut être considérée comme à un stade très avancé, il n'en est pas de même de celle des transducteurs qui doivent traiter du geste instrumental. Ces derniers doivent permettre la "perception gestuelle" de l'objet ; celle-ci regroupe les perceptions des sens proprioceptifs, du sens tactile... "Le transducteur gestuel universel, pour des raisons technologiques est aujourd'hui irréalisable. Aussi, le transducteur gestuel, sous sa forme générale se présentera nécessairement comme un ensemble de dispositifs complémentaires dans leurs fonctions... Le geste d'excitation, du fait de l'échange énergétique dont il est le support, ne peut s'exercer qu'au travers d'un transducteur gestuel rétroactif, les gestes "modificateurs" ou de "sélection" peuvent se concevoir comme déplacements purs ou comme efforts purs. Des systèmes mécaniquement plus simples (non rétroactifs), pourront leur servir de support (FLORENS 1984)."

La morphologie d'un transducteur le prédestine à ne couvrir qu'un domaine restreint de manipulation. Pour ce domaine de manipulation, cette morphologie induit, de par les contraintes de la technologie mécanique, des distorsions. Le transcodage du geste physique en signal numérisable ne peut se faire de façon totalement transparente. Il est néanmoins probable que les contraintes de la seule fonction de transduction gestuelle sont moindres que celles imposées par la fabrication entièrement mécanique des instruments "traditionnels".

Comme le souligne FLORENS(1978), "nous rencontrons au niveau même de la définition de notre champ expérimental, les mêmes obstacles que dans toute tentative de contrôle de processus incluant l'individu humain pour lequel les modèles cybernétiques sont actuellement trop limités".

L'étude de l'espace des gestes et la conception de dispositifs adéquats sont dans un premier temps indépendants du problème de la synthèse sonore. Ces réflexions sur le geste sont un préalable à l'utilisation judicieuse des transducteurs existants, "joysticks", pédales, claviers ou à la définition de nouveaux transducteurs si l'objet d'étude est le rapport instrumental à l'objet et non plus le contrôle en temps réel d'une composition sonore (cf A.2.4).

3. PREMIERES REALISATIONS.

3.1. Les transducteurs gestuels rétroactifs.

Le premier prototype de transducteur gestuel rétroactif a été construit par J-L.FLORENS(1978). Un second prototype a vu le jour en 1980. Ces deux transducteurs sont décrits dans l'article de CADOZ et al.(1981). Seul le second, utilisé pour la maquette CORDIS est ici présenté (figure 5). "Il correspond à une touche unique dont les dimensions ont été inspirées de celle de la touche de piano, avec cependant un enfoncement plus important (environ 5 cm). Il est bien certain que notre objectif n'est pas de reprendre rigoureusement les conditions du jeu sur clavier, bien que ce dernier entre dans une catégorie intéressante en soi."[CADOZ 1981]

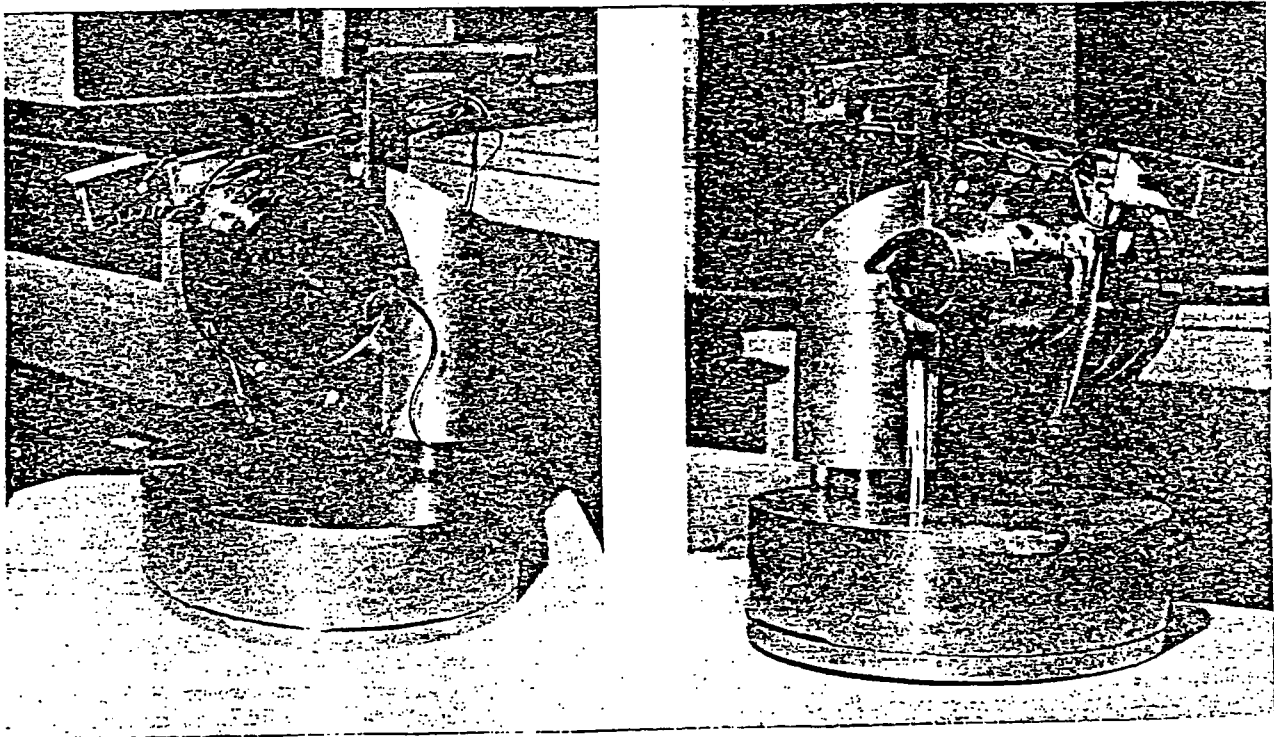
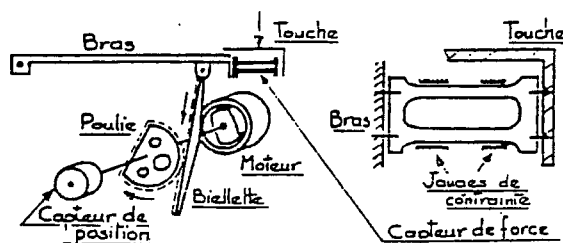


Figure 5

Le transducteur gestuel rétroactif "TOUCHE"



3.2. Le programme CORDIS logiciel (version 2).

3.2.1. Introduction.

Ce programme, implanté sur un ordinateur LSI 11-02, permet, en temps différé, la simulation des mécanismes instrumentaux. Les choix de modélisation et des algorithmes de simulation faits dans le cadre de la réalisation de ce programme sont ceux de la maquette CORDIS. C'est pourquoi, ils vont être explicités ici. CADOZ(1979,1981), BERBERYAN(1982) et surtout CADOZ(1982) décrivent le fonctionnement de ce programme du point de vue de l'utilisateur. Il est appelé ci-après CORDISV2.

3.2.2. Principe de modélisation et d'algorithmique.

Il s'agit de modéliser les mécanismes instrumentaux à partir de la typologie précédemment décrite (cf B.2.2.1), sans perdre de vue que les algorithmes de simulation déduits de cette modélisation doivent déboucher sur une simulation exécutable, en temps réel, sur un mini-ordinateur. On entend par algorithmique de CORDISV2, l'ensemble des algorithmes de simulation qui correspondent à des formules calculées par l'ordinateur, pour simuler des mécanismes instrumentaux.

Principe de modélisation.

La modélisation de l'univers instrumental dans CORDISV2 s'appuie sur une analyse des objets en constituants élémentaires. Toute structure mécanique est un assemblage de modules. Ces modules sont à base de trois constituants élémentaires :

- une masse ponctuelle sans dimension,
- un élément d'élasticité (appelé ressort) sans masse,
- un élément de frottement visqueux également sans masse.

Principe concernant les algorithmes de simulation

Leur choix repose sur un principe simple : A chaque module correspond bijectivement une suite de lignes de code résolvant l'algorithme propre à ce module. L'algorithme d'une structure est alors constitué de l'ensemble, agencé séquentiellement, des algorithmes des modules la composant.

Le comportement d'un module est évalué périodiquement, à une fréquence d'échantillonnage constante qui correspond à la fréquence d'échantillonnage, fixée indépendamment du mécanisme simulé.

Quatre étapes / Quatre objets / Définitions

Quatre étapes sont à distinguer lors de la fabrication d'un mécanisme instrumental avec le programme CORDISV2 :

- décider d'un objet réel à simuler.
- déduire un modèle physique de cet objet réel.
- discrétiser spatialement ce modèle afin qu'il se prête à une décomposition en modules (obtention d'un modèle physique discrétisé).
- décider des algorithmes des modules (obtention d'un modèle discrétisé spatialement et temporellement, appelé modèle échantillonné).

3.2.3. Les modules de CORDISV2.

Les modules se séparent en deux catégories duales : les modules matériels et les modules de liaisons.

"Les modules matériels reçoivent une entrée de force et fournissent une sortie de position. Les modules matériels sont la MASSE, la CELLULE et le SOL. La masse est l'élément de base pour la description des excitateurs. La cellule composée d'une masse reliée au sol par une liaison ressort/frottement est le module vibratoire le plus élémentaire.

Les modules de liaison linéaire sont le RESSORT, le FROTTEMENT, le RESSORT-FROTTEMENT, la PESANTEUR. Ils reçoivent deux entrées de position et fournissent deux sorties de force.

Les modules de liaison conditionnelle sont essentiels pour décrire la plupart des jonctions exciteuse/structure vibrante (percussion, pincement, excitation entretenue telle que frottement d'archet). La liaison conditionnelle est du même type qu'une liaison linéaire mais les valeurs des paramètres (raideur, frottement, longueur) et l'état des variables à un instant donné (positions, vitesses) dépendent de conditions [CADOZ 1983]."

La figure 6 illustre certains des modules de CORDISV2.

3.2.4. Les algorithmes de simulation.

Les algorithmes choisis découlent des conventions suivantes :

La variable continue $x(t)$ donnant la position à l'instant t d'un point matériel, est remplacée par la variable discrète $X(nT_e)$, en notation simplifiée $X(n)$. T_e représente la fréquence d'échantillonnage temporelle.

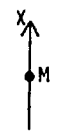
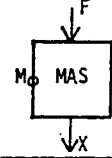
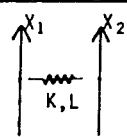
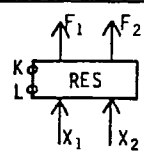
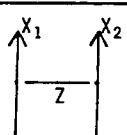
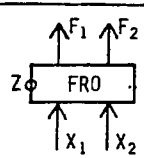
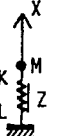
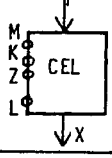
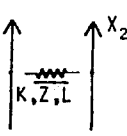
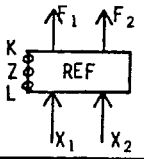
Mnémonique	Pictogramme	Diagramme	Algorithme
MAS masse			$X(n) = \frac{F(n)}{M} + 2X(n-1) - X(n-2)$
RES ressort			$F_2(n) = K \cdot (X_1(n) - X_2(n)) + K \cdot L$ $F_1 = -F_2$
FRO frottement			$F_2(n) = Z \cdot ((X_1(n) - X_1(n-1)) - (X_2(n) - X_2(n-1)))$ $F_1 = -F_2$
CEL cellule			$X(n) = \frac{F(n)}{M} + \left(2 - \frac{K+Z}{M}\right) \cdot X(n-1) + \left(\frac{Z}{M} - 1\right) \cdot X(n-2) + \frac{K \cdot L}{M}$
REF ressort frottement			$F_2(n) = (K+Z) \cdot (X_1(n) - X_2(n)) - Z \cdot (X_1(n-1) - X_2(n-1)) + K \cdot L$ $F_1(n) = -F_2$

Figure 6

Les modules de CORDISV2

On pose :

$$X'(n) = X(n) - X(n-1);$$

$$X''(n) = X(n+1) - 2X(n) + X(n-1).$$

La relation fondamentale de la dynamique $f(t) = m.x''(t)$ devient :

$$F(n) = m.[X(n+1) - 2X(n) + X(n-1)] ;$$

avec $F(n) = Te.Te.f(nTe)$.

Les principaux modules de CORDISV2 sont explicités par la figure 6. A chaque module correspondent quatre objets : un nom mnémotique, sa description mécanique sous forme de pictogramme, sa description en tant que module connectable, son algorithme. On distingue ici, les grandeurs $K, Z, 2-Z-K, \dots$ appelées paramètres numériques des grandeurs $X(n), F(n) \dots$ appelées variables.

3.2.5. Exemple : la corde vibrante.

On choisit comme modèle physique d'une corde réelle, une corde "idéale" caractérisée par les restrictions suivantes [RUIZ 1969] : la corde vibre dans un plan, tous ses points vibrent dans un même plan perpendiculaire à son axe, la tension est constante, la corde infiniment flexible, l'effet gravitationnel est négligeable, la corde est fixée de façon absolument rigide à ses extrémités, la corde est parfaitement homogène, l'amplitude de ses oscillations est faible devant sa longueur, l'effet de son environnement est négligé.

Un modèle physique discrétisé est obtenu en considérant cette corde "idéale" comme un ensemble de N masses reliées entre elles par des liaisons de type ressort/frottement. Les deux masses des extrémités sont reliées au sol par une liaison ressort/frottement.

Remarque

La modélisation d'une corde par CORDISV2 repose sur un certain nombre d'approximations. T.BERBERYAN(1979) vérifie que l'algorithme calculant le comportement de la ligne vibrante décrite ci-dessus, est semblable à celui d'une corde réelle en ce qui concerne les phénomènes de propagation. Le modèle physique discrétisé est une approximation du modèle physique car, le nombre des composantes vibratoires est égal au nombre de masses mises en jeu, le spectre n'est plus infini ; le rapport des fréquences des composantes obtenues n'est harmonique que si le nombre de masses est élevé. Dans le cas du modèle échantillonné, l'inharmonicité dépend non seulement du nombre de masses mais est aussi une fonction des paramètres des algorithmes et de la fréquence d'échantillonnage.

RUIZ(1969) proposait une synthèse des sons par simulation des cordes vibrantes. Il résolvait numériquement les équations différentielles régissant le mouvement des lignes vibrantes correspondant au modèle physique d'une corde dans le contexte CORDISV2. Pour ce faire, il discrétisait spatialement la corde en n points. La décomposition en modules n'avait, pour lui, pas lieu d'être. Les frottements et raideurs n'étaient pas réparties ; ces grandeurs apparaissaient de façon globale au niveau de l'équation différentielle de la corde. Imposant une relation entre fréquence d'échantillonnage et discrétisation spatiale, son algorithme de corde est la résolution exacte de l'équation différentielle en ce qui concerne les n premiers modes de la corde. Sa fréquence d'échantillonnage est donc dépendante de la structure qu'il simule ce qui n'est pas le cas dans CORDISV2. Il évite par cette méthode les dérives dues à la discrétisation spatiale et à l'algorithmique modulaire de CORDISV2, sur lesquelles nous allons revenir. Son étude montre la valeur du modèle physique de corde utilisé dans CORDISV2.

3.3. Remarques.

3.3.1. Langage /modélisation /algorithmes.

La notion de blocs modulaires combinables, le fait qu'un algorithme soit attaché à un module sont des propriétés de MUSIC5 reprises par CORDISV2. Elles conduisent à l'élaboration de langages, qui, outre leur relative simplicité pour l'utilisateur, sont susceptibles d'être "macrogénérer". ARFIB(1983) explique à propos de MUSIC5 :

"La macrogénération consiste à traduire un "macrocode" performant mais habituellement irréalisable par une seule opération matérielle (dans le sens de hardware), et que l'on décompose donc en une suite de micro-instructions, elles directement utilisables comme code machine."

Aux modules de CORDISV2 ou de MUSIC5 correspond un "macrocode". Pour augmenter la vitesse de calcul des échantillons, une direction logique de travail est de confier l'exécution de ce macrocode à un processeur spécialisé. Dans le cadre fixé par CORDISV2, une telle machine a été fabriquée par Talin BERBERYAN(1982,1983). Ce processeur sera présenté au chapitre B.4. L'ensemble des micro-instructions correspondant à un module permet le calcul de l'algorithme du module considéré.

3.3.2. Equations différentielles, filtrage numérique, processus récurrents et synthèse sonore.

L'utilisation d'algorithmes résultant d'équations différentielles n'est pas le propre de CORDISV2.

- Le travail de RUIZ(1969) sur la modélisation des cordes frappées, pincées, frottées s'attachait à décrire mécaniquement les phénomènes. Son travail n'a, à notre connaissance, pas connu de suite.
- Plus récemment, KARPLUS & STRONG(1983) ont développé un algorithme utilisant des filtres numériques récurrents pour modéliser fonctionnellement le comportement sonore de cordes ou de percussions. Cet algorithme n'a pas d'équation différentielle et donc de modèle mécanique lui correspondant. Il est facilement implantable sur microprocesseurs. JAFFE & SMITH(1983) étendent les possibilités de cet algorithme et perfectionnent la synthèse. Ils donnent une interprétation physique des différents filtres employés.
- RIOTTE(1984), s'inspire de l'équation de Mathieu (qui décrit les vibrations d'une membrane tendue et de forme elliptique) comme moyen de synthèse sonore, sans s'intéresser à un modèle mécanique vraiment précis.
- Pour mémoire, ajoutons que, sans se soucier d'une quelconque référence mécanique, BROWN(1976,1979) ou MITSUHASHI(1983) proposent différents processus récurrents comme système de synthèse.

Les équations aux différences se prêtent à une implantation sur des puces VLSI [WAWRZYNECK 1984, LIU 1984]. Les systèmes de synthèse à base d'équations aux différences, avec ou sans référence à des équations différentielles et à des modèles mécaniques, sont donc appelés à se développer. Mais, ce regain d'intérêt pour de tels systèmes de synthèse reste lié à l'état de la technologie. Les auteurs cités ci-dessus conçoivent leur système comme moyen de synthèse sonore. Si les paramètres manipulés ne sont plus ici forcément des paramètres acoustiques, les démarches restent attachées à la synthèse acoustique (cf A.4.3).

3.3.3. Problèmes liés à l'algorithmique de CORDISV2.

Modèle échantillonné / modèle physique discrétisé

Face à des algorithmes récurrents tels que ceux de CORDISV2, se posent, comme pour tout filtre numérique, deux problèmes :

- connaître le domaine de stabilité de l'algorithme (qui dépend de ses paramètres) ,
- dans ce domaine, saisir le type de distorsion existant entre l'algorithme numérique et l'équation différentielle qu'il représente.

T.BERBERYAN(1979) a consacré une étude à ces problèmes. Elle n'aboutit pas à une conclusion générale sur les domaines de valeurs possibles des paramètres. Elle étudie essentiellement les algorithmes de la ligne vibrante (cf 3.2.5) en fonction du nombre de masses qui la constituent. Les frottements visqueux sont considérés comme nuls dans cette étude.

Nous avons en partie repris cette étude ; elle est présentée en annexe. Les algorithmes de lignes vibrantes sont résolus dans le cas plus général où il existe des pertes par frottements. Le domaine de valeurs stables des paramètres se précise, illustrant les limites de la représentation du modèle physique discrétisé par le modèle échantillonné. Cette étude appelle par ailleurs deux commentaires :

La modularité

L'étude de l'annexe 1 montre que la plage de variation d'un paramètre d'un algorithme d'un module est dépendante du système d'équations formé par l'ensemble des algorithmes des modules constituant une structure instrumentale. Il y a là une contradiction avec la notion de modularité. Si l'utilisateur construit deux mécanismes bien représentés par leurs algorithmes respectifs, c'est dire en particulier que ces algorithmes sont stables, l'algorithme de leur combinaison peut être instable.

Langage de construction des mécanismes instrumentaux

Comme toutes les valeurs des paramètres des algorithmes ne sont pas utilisables, des contraintes apparaissent dans la conception du mode opératoire et du langage à proposer à l'utilisateur. La solution la plus simple est adoptée dans CORDISV2 ; l'utilisateur prend à sa charge de savoir si telle valeur de paramètre est utilisable ou non.

3.4. Conclusion.

Le programme CORDISV2 a permis de réaliser un certain nombre de simulations démonstratives. Des sons de cordes pincées, frappées, frottées ont pu être calculés, mais en temps différé (CADOZ 1981,1983). Le temps différé rendait la relation geste/son inexistante. Seul un comportement mécanique lent est simulable en temps réel. Un mécanisme d'excitation à percussion/échappement a ainsi été expérimenté (CADOZ 1981).

"Le manipulateur agit sur la touche du transducteur gestuel rétroactif et reçoit dans le même temps, l'information gestuelle sur le comportement de celle-ci, et une image sur écran, de la touche, du marteau et de la corde".

Ces expériences montrent, en pratique, l'intérêt du système CORDIS, justifient les choix de modélisation et d'algorithmique opérés dans le cadre de CORDISV2. Même si des distorsions existent entre objet réel et objet simulé par les algorithmes de CORDISV2, celles-ci ne rendent pas caduques les rapports entre ces deux objets en ce qui concerne les perceptions sonore, visuelle et tactilo-kinesthésique.

La conception d'un nouveau système CORDIS où se correspondraient, en temps réel, action gestuelle et l'ensemble des perceptions découlant de cette action pouvait être envisagée.

4. LE PROCESSEUR CORDIS-TEMPS-REEL.

4.1. Introduction.

Le processeur Cordis-Temps-Réel (en abrégé CTR) a été conçu et construit par Talin Dars-Berberyan (BERBERYAN 1982,1983). Il était l'objet de sa thèse dont ce chapitre constitue, en quelque sorte, un additif. L'architecture et le fonctionnement du CTR sont analysés de façon, d'une part, à pouvoir expliquer la phase de mise au point de la machine et, d'autre part, donner les éléments nécessaires pour la programmation du CTR. Cette présentation du CTR est à l'usage des personnes amenées à le programmer. Elle résulte d'un travail de compilation d'un certain nombre de documents écrits par Talin Berberyan lors de la réalisation du CTR.

4.2. Rôle et principe d'utilisation.

Le CTR prend en charge le calcul des algorithmes de certains des modules de CORDISV2 permettant de décrire une structure vibrante. Plus exactement, le CTR permet de simuler des comportements mécaniques rapides. Un comportement rapide est à associer à une bande passante acoustique (ici 15Hz-12,5kHz), et, à opposer à comportement lent relatif à une bande passante "gestuelle" (ici 0-50Hz). Le CTR est un périphérique d'un ordinateur hôte LSI 11-02.

L'utilisation du CTR oblige à considérer un mécanisme instrumental comme composé de deux parties : l'une lente et l'autre rapide. En particulier, la structure vibrante peut s'identifier à la partie rapide et l'excitateur à la partie lente, mais ce n'est pas toujours le cas. Si la structure vibrante est toujours incluse dans la partie rapide, il peut en être de même pour une partie de l'excitateur. Ainsi lors du choc d'un marteau sur une corde, ces deux éléments ont un comportement rapide.

Deux étapes sont à distinguer lors de l'utilisation du CTR :

- Le CTR est à l'arrêt : Un ensemble de données décrivant le fonctionnement d'un instrument est fabriqué dans l'ordinateur hôte. Le sous-ensemble de données permettant la simulation de la partie rapide est chargé dans les mémoires du CTR. Le sous-ensemble de données permettant la simulation de la partie lente (en particulier le traitement des aspects gestuels) sera exécuté par l'ordinateur hôte.

- Le CTR exécute périodiquement une boucle de calcul à une fréquence de 25,6kHz maximum. Il simule alors, en temps réel, le comportement de la partie rapide en fonction de celui de la partie lente.

4.3. La communication CTR-LSI.

La liaison entre les deux calculateurs permet : le chargement des données pour une simulation, le contrôle du fonctionnement du CTR, et la communication bilatérale entre simulation lente et simulation rapide au cours de la phase calcul. Cette communication nécessite un filtrage d'adaptation entre les deux fréquences d'échantillonnage, la fréquence lente qui concerne la simulation dans le LSI et la fréquence rapide du CTR. En effet, sans ce filtre, l'envoi d'une donnée provenant de la partie lente au CTR prend la forme d'une fonction en escalier pour la simulation rapide. Ces discontinuités sont sources de distorsions de comportement par rapport au modèle physique.

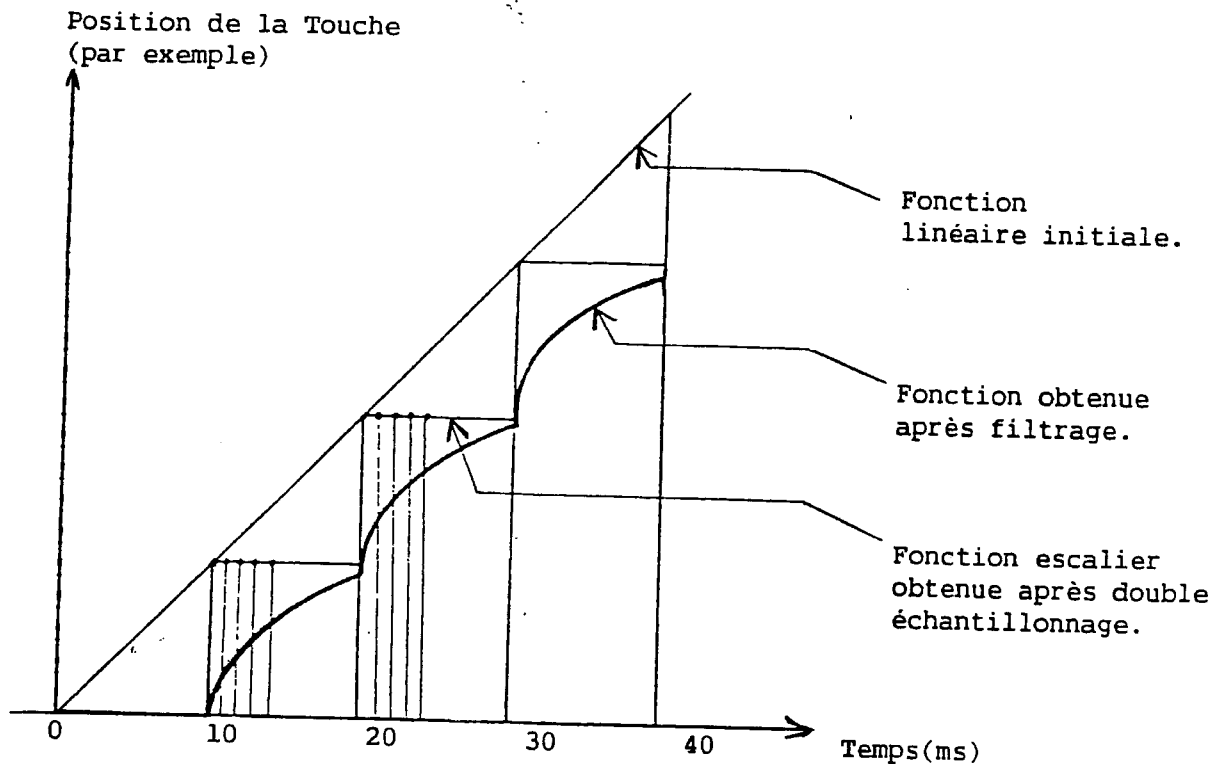


Figure 7

Effet du filtre d'adaptation du CTR

4.4. Architecture et fonctionnement du CTR.

4.4.1. Introduction.

La nécessité d'un calcul le plus rapide possible et les algorithmes de simulation choisis ont conduit à :

- l'utilisation de techniques de microprogrammation des algorithmes,
- une spécialisation poussée des différentes mémoires du CTR,
- l'utilisation simultanée de techniques de pipeline et de calcul en parallèle,
- la réalisation, sur 32 bits, d'une unité arithmétique et logique, d'un multiplieur et d'un opérateur test.

4.4.2. Architecture générale.

Elle est illustrée par la figure 8. Le CTR possède trois organes principaux :

- le processeur interne,
- le processeur d'entrée/sortie,
- le processeur de sortie sonore.

Le processeur d'entrée/sortie permet le filtrage d'adaptation entre calcul lent et calcul rapide. Le processeur interne effectue le calcul rapide des échantillons selon les algorithmes de simulation. Le processeur de sortie sonore effectue un cadrage des données destinées aux convertisseurs numérique/analogique pour obtenir la sortie sonore.

La communication CTR-LSI est réalisée matériellement par un interface (cf ci-après) avec le LSI 11, deux lignes d'interruption, le processeur d'entrée/sortie, et une mémoire tampon. Cette dernière contient les données issues du calcul de la simulation lente nécessaires au calcul du fonctionnement de la partie rapide, et vice-versa. La fréquence lente est fixée à 100Hz. La fréquence rapide est à choisir entre 6,4kHz, 9,6kHz, 12,8kHz, 16kHz, 19,2kHz, 22,4kHz, 25,6kHz. Ce choix s'effectue à l'aide d'un potentiomètre placé sur la face avant du boîtier du CTR. Ces deux fréquences sont obtenues par division de la fréquence de l'horloge interne du CTR. La fréquence lente est transmise au LSI par une ligne d'interruption du CTR.

Enfin, le CTR contient un automate de transfert chargé d'assurer la communication entre les différents processeurs du CTR, et entre la mémoire tampon et le processeur d'entrée/sortie.

Une boucle de calcul du CTR est divisée en trois temps :

- l'automate de transfert agit,
- les trois processeurs travaillent en parallèle,
- attente de la fin de la période d'échantillonnage avant d'aborder un nouveau tour de boucle.

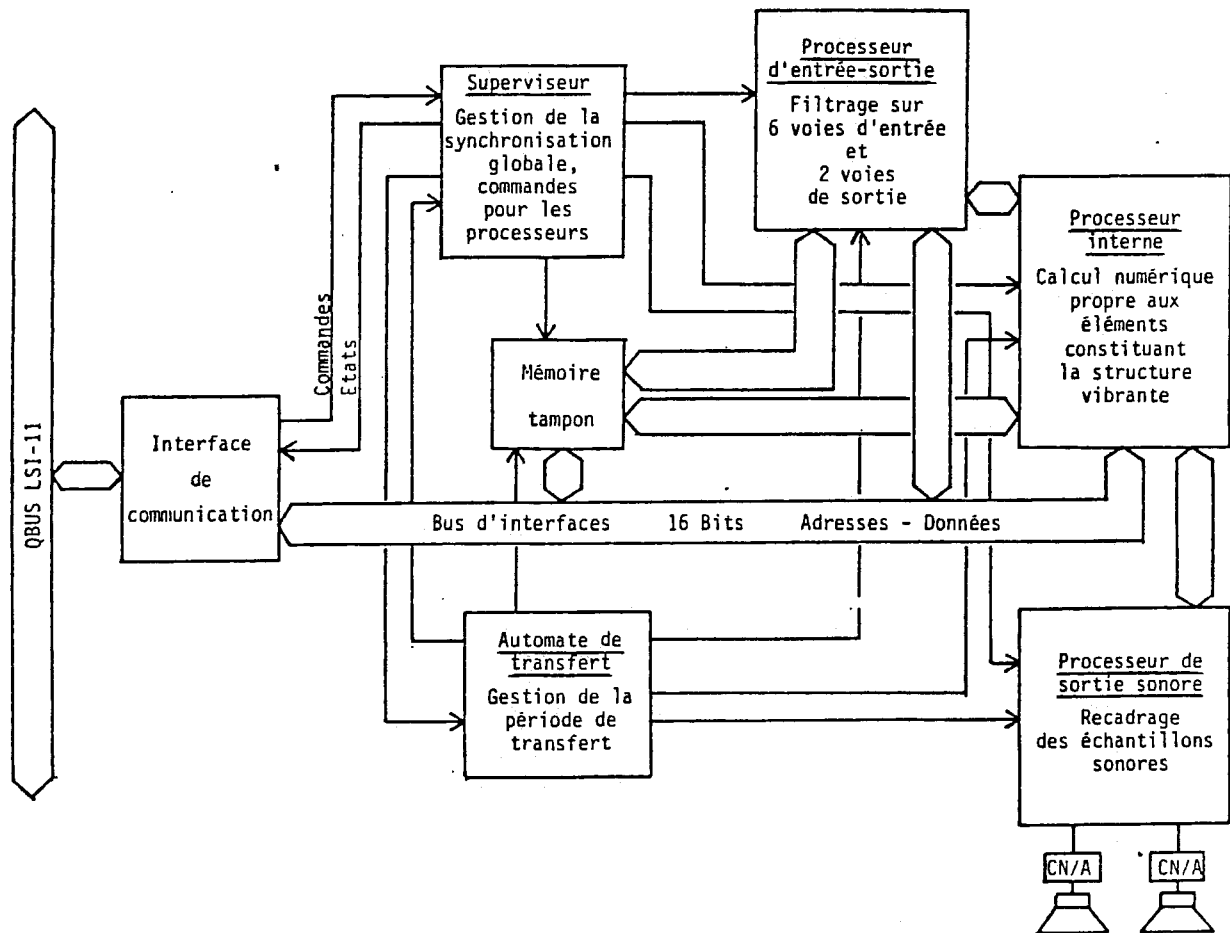


Figure 8

Shéma général du CTR (d'après BERBERYAN 1982).

4.4.3. L'interface de communication CTR-LSI.

C'est un interface parallèle 16 bits. Il contient quatre registres :

MEC : mot d'état et de contrôle. De sa valeur dépend l'état du CTR ; en calcul, à l'arrêt...

RAI : registre d'adresse de l'interface. Les différentes mémoires du CTR ont chacune une adresse ; charger RAI permet d'accéder à une de ces cases mémoires. Pour y écrire ou la lire, on dispose de deux autres registres :

AAM : sert pour toutes les mémoires autres que la mémoire tampon,

AAR : est utilisé pour la mémoire tampon.

Le registre RAI est auto-incrémenté par toute lecture ou écriture de AAM ou AAR.

4.4.4. Les mémoires accessibles par l'interface.

Elles sont au nombre de cinq :

MP : mémoire de programme. Elle doit contenir la suite d'instructions nécessaire pour simuler la sous-structure rapide d'un mécanisme. Le processeur interne exécute les calculs à partir de cette suite d'instructions. Une instruction est soit un mot de 16 bits, soit deux mots de 16 bits.

MESI : mémoire des entrée/sortie intermédiaire. Elle contient les variables manipulées par les microprogrammes.

MC : mémoire de coefficients. Elle contient les paramètres manipulés par les microprogrammes.

La figure 9 montre la structure de MESI et MC en pages. Chaque page, constituée par 32 cases de 32bits, contient un type de variable ou un type de paramètre. Les variables et paramètres sont des réels codés en virgule fixe sur 32 bits ; la partie décimale est codée sur 24 bits.

COEF : mémoire contenant les valeurs des coefficients du filtre d'entrée/sortie. Les coefficients du filtre sont des réels codés en virgule fixe sur 32 bits ; la partie décimale est ici codée sur 30 bits.

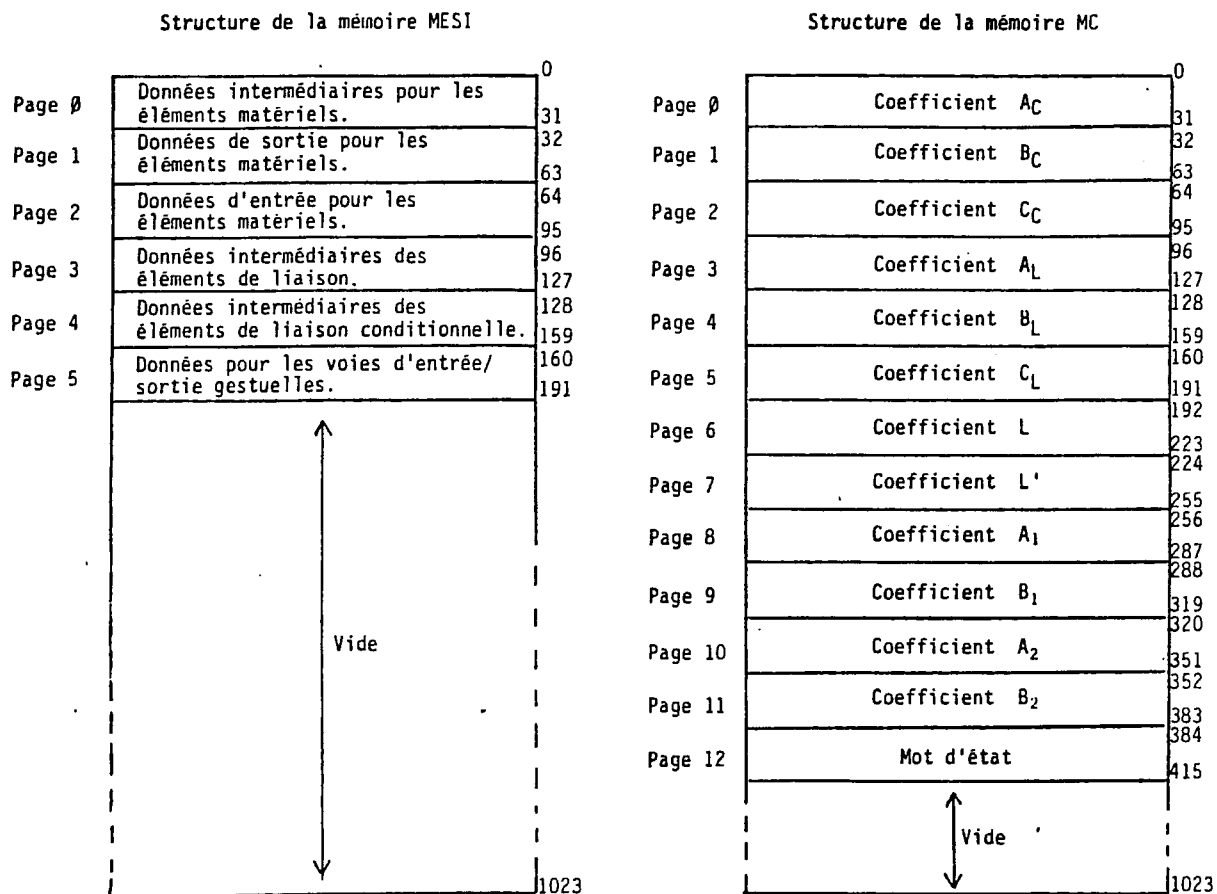


Figure 9

Structure des mémoires MESI et MC.

MREG : mémoire tampon. Elle se décompose en trois parties :

- 6 voies d'entrée contenant les données lentes destinées au calcul rapide,
- 2 voies de sortie contenant les données rapides destinées au calcul lent,
- 1 voie d'entrée contenant le "mot d'état des conditions extérieures"(voir ci-dessous le module de code CDX).

Remarques

La mémoire COEF n'est accessible qu'en écriture et si le CTR est à l'arrêt. Les mémoires MC, MESI, MP, MREG sont accessibles en lecture/écriture si le CTR est à l'arrêt. Seule la mémoire MREG est accessible quand le CTR calcule.

L'automate de transfert et le processeur d'entrée/sortie effectuent le filtrage des données des six voies d'entrée de la mémoire MREG et déposent le résultat dans la mémoire MESI, page 5, case 0 à 5. Ils envoient, par ailleurs les données des cases 6 et 7 de cette page dans les deux voies de sortie de MREG.

4.5. Le jeu d'instructions et les microprogrammes du CTR.

4.5.1. Introduction / définitions.

Pour que le programmeur sache comment remplir les mémoires ci-dessus, il doit connaître le jeu d'instructions et le fonctionnement global des microprogrammes du CTR.

Une instruction, élément de la mémoire MP, permet d'exécuter un module du CTR. Le terme module est ici à prendre dans le sens de module de calcul. Module et instruction possèdent, par convention, un même mnémonique. Un module correspond matériellement à un microprogramme et un ensemble de cases mémoires de MC, MESI, MREG où sont rangés paramètres et variables que manipulera le microprogramme.

Chaque mnémonique est constitué d'un code de 2 ou 3 lettres et d'un ou plusieurs entiers. BERBERYAN(1982 p78-79) donne les lois de correspondance entre mnémoniques (écriture alphanumérique) et instructions effectives (code binaire). Il y a 22 codes différents auxquels correspondent bijectivement 22 microprogrammes. Le code, associé aux entiers, permet le calcul des adresses des cases mémoires de MESI, MC, ou MREG du module.

Les modules se répartissent en quatre catégories :

- Les modules internes, dont les microprogrammes correspondent à des algorithmes de CORDISV2.
- Les modules d'entrée/sortie lentes qui permettent la communication LSI-CTR.
- Les modules de sortie sonore.
- Un module utilitaire associé à l'instruction de mnémonique "FIN". Elle indique la fin de la séquence d'instructions.

4.5.2. Les modules internes.

Ils définissent la structure rapide. Ils comprennent des modules matériels et des modules de liaison (cf B.3.2.3). Les modules de liaison relient 2 modules matériels ; ils sont de deux types, liaison simple ou conditionnelle.

MODULES CEL i

Description

Le CTR ne simule qu'un seul type de module matériel de CORDISV2, la cellule unitaire. Celle-ci modélise un point matériel de masse 1, relié à un point fixe par un ressort et un frottement. Le CTR est construit pour simuler au plus 32 cellules unitaires simultanément. Le mnémonique correspondant est "CELi" ou "CEL" désigne le code du microprogramme et i le numéro ou identificateur de la cellule simulée.

Action du microprogramme

Le microprogramme calcule l'algorithme suivant :

$$X_i(n) = F_i(n-1) + A_{Ci}.X_i(n-1) + B_{Ci}.X_i(n-2) + C_{Ci}$$

où

$X_i(n)$ est le déplacement à l'instant nT_e du point matériel,
 $F_i(n-1)$ est l'ensemble des forces extérieures qui lui est appliqué.
 $X_i(n-2)$, $X_i(n-1)$, $F_i(n-1)$ sont stockés dans MESI, respectivement pages 0,1,2.

A_{Ci} , B_{Ci} , C_{Ci} sont des paramètres stockés dans la mémoire MC (pages 0,1,2) qui dépendent des coefficients de raideur (K_{Ci}) et frottement (Z_{Ci}) de la cellule unitaire.

$$A_{Ci} = 2 - K_{Ci} - Z_{Ci}$$

$$B_{Ci} = Z_{Ci} - 1$$

$$C_{Ci} = K_{Ci}.X_0$$

où X_0 est la position initiale de la cellule.

Le calcul de $X(n)$ terminé, le microprogramme exécute $F_i(n-1) = 0$. Cette case de MESI est alors prête à recevoir la somme des forces calculées par les éléments de liaisons attachés à cet élément matériel.

MODULES LIA i,j,k

Description

La liaison simple est le seul élément de liaison linéaire de COR-DISV2 simulé dans le CTR. Elle est formée par un élément de raideur et un élément de frottement en parallèle. Son mnémonique est "LIA i,j,k" où, i est l'identificateur de la liaison, le couple (j,k) permet d'identifier les modules matériels qu'elle relie.

Action du microprogramme

Le microprogramme calcule l'algorithme :

$$\begin{aligned} F_k(n) &= ALi.((X_j - X_k)(n)) + BLi.((X_j - X_k)(n-1)) + CLi \\ F_j(n) &= - F_k(n) \end{aligned}$$

où

F_k/F_j représente les forces appliquées aux modules matériels de numéro k/j par la liaison simple de numéro i.

ALi , BLi , CLi sont des paramètres stockés respectivement pages 3,4,5 de MC. Ils dépendent des coefficients de raideur (KLi) et de frottement (ZLi) de la liaison

$$ALi = - KLi - ZLi$$

$$BLi = - ZLi$$

$$CLi = KLi.(X_{0j} - X_{0k})$$

où X_{0j} , X_{0k} sont respectivement les positions initiales des éléments matériels d'identificateur j et k.

$(X_j - X_k)(n-1)$ est stocké page 3 de MESI.

Une fois le calcul de F_k et F_j achevé, le microprogramme accumule ces deux valeurs dans les deux cases de MESI destinées à recevoir $F_k(n)$ et $F_j(n)$.

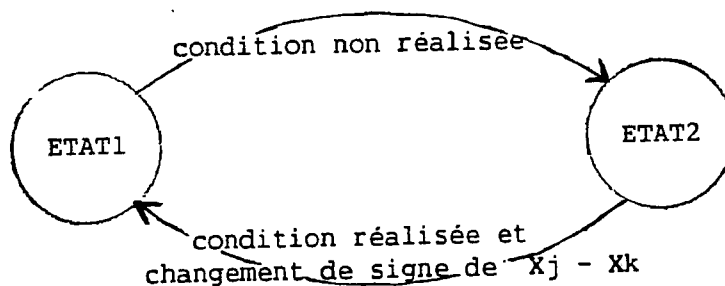


Figure 10

Diagramme d'état des modules de liaison conditionnelle.

MODULES UNL i,j,k / ECH i,j,k / CDX i,j,k

Description

La liaison conditionnelle est une liaison simple qui peut prendre deux états. Le diagramme d'état est illustré par la figure 10. Les entiers i,j,k ont même signification que pour une liaison simple. Il y a 3 types de liaisons conditionnelles auxquels correspondent trois types de conditions et donc trois microprogrammes :

- Le code "UNL" désigne la liaison unilatérale (utile pour simuler des chocs de type percussifs).
- Le code "ECH" désigne la liaison à échappement (utile pour simuler des pincements).

Pour ces deux liaisons conditionnelles, la condition dépend de deux paramètres L et L', stockés respectivement pages 6 et 7 de MC.

Pour un module "UNL i,j,k" la condition est :

$$X_j(n) + L' < X_k(n) < L + X_j(n).$$

Pour un module "ECH i,j,k" la condition est : $L' < X_j(n) < L$.

- Le code "CDX" désigne une liaison soumise à une condition extérieure. L'entier i, identificateur, désigne de plus le ième bit du mot d'état des conditions extérieures stocké dans MREG. Selon que ce bit est mis à 1 ou 0 la condition est ou non réalisée. Ce mot n'a que 8 bits, il n'y a donc que 8 modules de code "CDX".

Action du microprogramme

Utilisant l'opérateur test du CTR, il détermine l'état de la liaison puis, calcule l'algorithme :

$$\begin{aligned} F_k(n) &= A_i((X_j - X_k)(n)) + B_i((X_j - X_k)(n-1)) \\ F_j(n) &= - F_k(n) \end{aligned}$$

où les notations sont les mêmes que pour la liaison simple, mais,
(A_i, B_i) = (A_{1i}, B_{1i}) si la condition est réalisée,
(A_i, B_i) = (A_{2i}, B_{2i}) si la condition n'est pas réalisée.
A_{1i}, B_{1i}, A_{2i}, B_{2i} sont stockés page 8,9,10,11 de MC.

Remarque : Les modules de code ECH, UNL, CDX, entrent en concurrence pour l'occupation des cases mémoire des pages 6 à 12 de MC. Pour que plusieurs modules de liaisons conditionnelles soient exécutables, il faut que leurs identificateurs (c.a.d. l'entier i) soient différents.

4.5.3. Les modules d'entrée-sortie lents.

4.5.3.1. Introduction.

Ils permettent la prise en compte, par le calcul rapide, des données issues du calcul lent. Ces modules se répartissent en deux groupes, reflets des deux types différents d'actions possibles sur la structure rapide : l'action d'excitation qui fournit de l'énergie mécanique à la structure rapide, l'action de modification qui consiste ici, concrètement, à changer une ou des valeurs de paramètres manipulés par les algorithmes.

4.5.3.2. Les modules d'excitation.

Ils sont de quatre types répartis en deux catégories :

MODULES PL i,e / PLF i,e,s (excitation en position)

Ce sont des modules matériels. La position n'est pas le résultat d'un calcul mais d'un transfert. L'instruction de mnémonique "PL i,e" transfère la donnée de la case e de la page 5 de MESI dans la ième case de la page 1 de MESI. L'instruction de mnémonique "PLF i,e,s" fait de même et opère de plus un transfert de la ième case de la page 2 de MESI vers la case s de la page 5 de MESI. Il existe au plus quatre modules de cette catégorie (i est égal à 28,29,30 ou 31).

Les modules de code PL, PLF, et CEL sont en concurrence pour l'attribution des cases mémoires des pages 0,1,2 de MESI. Ils ne seront exécutables que si leurs identificateurs sont différents.

MODULES FL i,e / FLP i,e,s (excitation en force)

Ce sont des modules de liaison. L'instruction "FL i,e" accumule dans la ième case de la page 2 de la mémoire MESI, la valeur qui se trouve dans la case e de la page 5. L'instruction "FLP i,e,s" fait de même et transmet de plus la position de la ième case de la page 1 de MESI dans la case s de la page 5 de MESI. Pour ces deux instructions, l'identificateur i qui désigne un élément matériel ne peut prendre que des valeurs comprises entre 0 et 27.

4.5.3.3. MODULES CLPX i,e.

Ce sont les modules de modification. Ils permettent le contrôle lent de la valeur du paramètre Xi. Ils transfèrent la donnée de la case e de la page 5 de MESI à l'adresse du paramètre Xi. Xi désigne l'un quelconque des paramètres du type AC,BC,CC,AL,BL,CL,A1,B1,A2,B2.

4.5.4. MODULES SOR i,n.

Ces modules, dits de sortie sonore, permettent une sortie stéréophonique.

i désigne la voie de sortie (droite ou gauche),

n est le numéro de l'élément matériel dont la position est envoyée en sortie.

Chacune des deux variables de sortie peut être une somme de positions de plusieurs cellules.

4.5.5. Ordre d'un programme.

Vus les fonctionnements des microprogrammes, l'utilisateur constituant un programme, c'est-à-dire, une séquence d'instructions pour MP a intérêt à respecter les règles suivantes pour qu'il soit exécutable :

- Placer en tête les instructions de code CLP pour que les microprogrammes des modules internes calculent avec de bonnes valeurs de paramètres.
- Mettre ensuite les instructions des modules matériels.
- Faire suivre soit par les instructions des modules de liaisons, soit par les instructions des modules de sortie sonore. (L'exécution des algorithmes des modules matériels fait bien de précéder celle des algorithmes de liaisons vu la gestion des variables de type force par les microprogrammes).

4.5.6. Remarques.

Les performances du CTR sont limitées par les contraintes technologiques (cf BERBERYAN 1982 particulièrement p97-100). Insistons sur deux faits :

- La structure de la machine fait qu'elle ne peut calculer le comportement que d'un faible nombre de modules de CORDISV2 (32 cellules, 32 liaisons, 32 liaisons conditionnelles au plus). En fait, toutes les combinaisons de module ne sont pas simulables en temps réel à 25,6 kHz. Le cycle de base du CTR est de 150ns, chaque microprogramme dure entre 4 et 23 cycles de base. Pour qu'un calcul de comportement d'une structure rapide soit possible, il faut que la durée d'exécution de l'ensemble des microprogrammes qui lui correspondent soit inférieure à la période d'échantillonnage T_e ($T_e = 0,04$ ms). Ainsi, seules des "cordes" de une à douze masses sont simulables à la fréquence de 25,6kHz.

- Le CTR ne possède pas de moyen de stocker des échantillons sonores. Il est ainsi inapte au calcul en temps différé. Par ailleurs, l'accès à ces échantillons aurait permis, dans la phase de test de la machine, de juger exactement de la simulation. Les signaux sonores du CTR ne peuvent être jugés que macroscopiquement, à l'oreille ou à l'aide d'oscilloscopes...

5. MISE AU POINT DU PROCESSEUR CTR.

Ce chapitre résume l'ensemble des travaux techniques effectués pour mettre au point le processeur Cordis-Temps-Réel. Cette mise au point, bien qu'elle n'entre pas directement dans le sujet de notre étude, a été nécessaire avant tout autre développement. Elle a constitué une tâche assez lourde.

5.1. Premiers tests globaux du CTR.

Les différentes parties du CTR avaient déjà été testées par son concepteur [BERBERYAN 1982]. Les tests de fonctionnement de l'ensemble une fois connecté au LSI restaient à faire. La première phase de test s'est déroulée en deux étapes.

5.1.1. Première étape.

Il s'agissait [LACORNERIE 1982] :

- de définir les directions principales d'un logiciel aussi complet que CORDISV2 qui intégrerait les possibilités ouverte par l'utilisation du CTR,
- de réaliser une première version de ce logiciel, volontairement simplifiée, afin d'arriver rapidement à la mise en place de démonstrations convaincantes de l'utilisation du CTR,
- d'utiliser ce logiciel comme premier test du fonctionnement global du CTR.

Les stades successifs de réalisation de ce logiciel fournissent à l'utilisateur les moyens de tester et d'utiliser :

- la simulation d'une cellule par le CTR pour différentes valeurs de raideurs et frottements,
- la simulation d'une structure vibrante constituée d'un assemblage quelconque de cellules et de liaisons,
- la possibilité effective de contrôler, en temps réel, par un geste de modulation, la valeur du paramètre raideur d'une cellule simulée par le CTR.

A l'issue de cette première étape, aucun dysfonctionnement du CTR n'était apparu.

5.1.2. Geste instrumental en temps réel.

La deuxième étape, réalisée à partir d'une extension du logiciel précédent, a eu un caractère démonstratif décisif pour le projet CORDIS. L'expérience essentielle est décrite par BERBERYAN(1982). Il s'agit de la simulation en temps réel du pincement d'une structure

vibrante (une corde de 8 masses par exemple), par un opérateur manipulant le transducteur gestuel rétroactif "Touche" (cf B.3.1) comme une touche de clavecin. La comparaison de 2 situations de jeu, avec et sans retour d'effort, montre de façon décisive, en pratique, l'effet sensible de la fonction de rétroaction gestuelle.

Cette étape met, par contre, en évidence certains dysfonctionnements du CTR :

- Le CTR fait des erreurs de calcul quand la température augmente.
- La case de MREG contenant le mot d'état des conditions extérieures semble inaccessible via l'interface LSI-CTR.
- Les transmissions LSI-CTR ne sont pas fiables ; les valeurs lues dans MREG sont, épisodiquement, fausses. Par ailleurs, une demande de lecture dans MREG peut ne pas être acceptée ; le bus du LSI génère alors un signal d'alerte ("timeout"), qui interrompt le programme en cours.
- Le microprogramme des modules de liaison conditionnelle de type échappement ne prend pas toujours en compte le paramètre *i* de l'instruction de mnémonique ECH *i,j,k*.
- Le contrôle de paramètre de type frottement peut entraîner des calculs aberrants.
- L'initialisation du filtre d'adaptation du CTR pose problème.

5.1.3. Conclusion.

A l'issue de ces deux étapes, on dispose d'un logiciel fait essentiellement à des fins démonstratives, qui ne permet pas de manipuler tous les modules du CTR, et de symptômes dont le diagnostic est délicat. La mise au point du CTR nécessite une phase de tests logiciels systématiques effectués au plus près de la machine, afin de trouver les organes du CTR comportant des déficiences.

Le logiciel d'utilisation du CTR se décompose assez naturellement en trois niveaux de complexité :

- Le premier niveau prend en charge la communication avec l'interface LSI-CTR.
- Le second niveau se définit à partir de l'analyse des fonctions du CTR, c'est-à-dire, des objets qu'il utilise (programmes, paramètres, variables...), et des actions à effectuer sur ces objets (charger un programme, initialiser une variable...).
- Le troisième niveau, utilisant les deux précédents, répond aux exigences du système CORDIS.

Les deux premiers niveaux de logiciel, étroitement liés à la structure matérielle du CTR seront des aides précieux pour les tests. Ils sont explicités dans une notice interne.

5.2. Tests systématiques et remaniements du CTR.

5.2.1. Introduction.

Programmes de tests et CTR étant, chacun dans leur domaine, des prototypes, quand un test logiciel échoue, cinq raisons peuvent en être la cause :

- Le programme de test est erroné (faute de conception ou de réalisation).
- Le programme et le CTR fonctionnent correctement. Ce sont les algorithmes de CORDISV2, dont on n'a qu'une théorie parcellaire, qui entraînent une simulation n'ayant pas de sens.
- Le CTR ou l'interface LSI-CTR viennent de tomber en panne.
- Il y a eu une erreur de câblage lors de la construction du CTR.
- Le câblage est correct mais les plans ou d'autres documents révèlent une erreur ou des insuffisances dans la conception de la machine.

Chaque mise au point ou série de tests fait l'objet d'un rapport interne.

5.2.2. Remaniement du conditionnement du CTR.

Le CTR étant insuffisamment ventilé, la modification du boîtier contenant son électronique s'impose. Trois ventilateurs, au lieu de deux initialement, sont installés.

5.2.3. Programmes de test de l'interface et, du CTR à l'arrêt.

Ces programmes permettent de vérifier que le chargement des mémoires du CTR peut s'effectuer correctement. Ces programmes sont écrits en assembleur du LSI et utilisent le logiciel de communication avec l'interface.

Les tests ont montré que la case de MREG contenant le "mot de l'état des conditions extérieures" n'était pas accessible. L'étude des plans de la machine et son câblage ont confirmé cette absence. Câblage et plans sont alors modifiés en conséquence. Ces programmes permettent, par ailleurs, de tester les interruptions envoyées par le CTR.

5.2.4. Test des modules du CTR.

On cherchait d'éventuelles erreurs dans l'écriture des microprogrammes. Ils sont testés un à un par chargement dans le CTR de modules les utilisant. Les programmes de test des modules utilisent les deux premiers niveaux de logiciel (cf B.5.1.3). Au bout du compte, seul le microprogramme de code ECH est erroné. Il manquait, dès sa conception, une instruction à ce microprogramme. L'ensemble des microprogrammes fût réécrit dans de nouveaux boîtiers mémoire.

5.2.5. Communication LSI-CTR en phase de jeu.

Situons la nature du problème : en phase de jeu (au sens du système CORDIS), un expérimentateur applique des gestes sur une structure mécanique simulée ; le CTR calcule, simulation lente et rapide échantillant des données. Des erreurs dans les transmissions se traduisent par de fausses sensations sonores, visuelles, tactiles et kinesthésiques. Corriger ces erreurs est donc impératif. Les organes du CTR qui assurent les transmissions sont la mémoire MREG, le filtre d'adaptation et le processeur d'entrée-sortie.

5.2.5.1. Filtre d'adaptation du CTR.

Initialisation du filtre.

Ce filtre possède deux mémoires internes, ME et MS [BERBERYAN 1982p88], auxquelles l'utilisateur n'a pas accès par l'interface. ME contient les données avant filtrage, MS le résultat du filtrage. Initialiser un transfert LSI-CTR suppose l'initialisation de MREG, ME, MS, MESI.

L'initialisation de ces mémoires est possible en faisant fonctionner seul le processeur d'entrée/sortie. La mémoire programme est chargée par le seul module utilitaire FIN, MREG par les valeurs d'initialisation désirées. Le CTR est mis en phase calcul. Au bout d'un temps dépendant des constantes de temps du filtre (donc des valeurs de ses coefficients), les bonnes valeurs d'initialisation se trouvent dans MREG, ME, MS et page 5 de MESI.

Erreurs dues à la conception du filtre d'adaptation

L'équation du filtre est :

$$y(n) = x(n) + A.y(n-1) + B.y(n-2)$$

où

$y(n)$ est la variable de sortie du filtre à l'instant nT_e ,

$x(n)$ est la variable d'entrée à l'instant nT_e ,

A, B sont les coefficients du filtre.

L'erreur moyenne en sortie du filtre est de l'ordre de [BERBERYAN 1982p59] :

$$E = q/K$$

où E est l'erreur moyenne,

q est le pas de quantification,

K est l'inverse du gain du filtre ; $K = 1 - A - B$.

Pour un filtrage d'adaptation entre fréquences de 100Hz et de 25,6kHz, $1/K = 2806$. Avec le choix de représentation des données en format 32 bits avec virgule fixe après le 23ème bit, le pas de quantification vaut $5.96E-8$.

L'erreur de filtrage pour un paramètre numérique force, position, raideur, ou frottement, est d'environ $1.7E-4$.

De fait, ce filtre du deuxième ordre entraîne une erreur proportionnelle à son efficacité à filtrer la fréquence lente. Son utilisation comme filtre d'adaptation est donc discutable.

Pour les raideurs, les positions, les forces, cette erreur est en pratique négligeable. Mais l'expérience montre que les valeurs de frottement numériques sont souvent dans l'intervalle $[1.0E-7, 1.0E-4]$. Le contrôle, par un geste de modification, de la valeur de grandeurs de type frottement, est donc impossible dans cet intervalle. L'erreur de filtrage des frottements peut même conduire à transmettre au calcul interne du CTR des valeurs de frottement négatives induisant des calculs absurdes.

Le filtre d'adaptation du CTR représente environ un quart de l'électronique de la machine ; il n'est guère envisageable de le modifier.

5.2.5.2. Remaniements de la communication LSI-CTR.

Explication du conflit CTR-LSI.

Les accès du CTR et du LSI à MREG sont asynchrones. Le CTR lit et écrit à la fréquence rapide, le LSI fait de même mais à la fréquence lente. Au cas où deux demandes de lecture/écriture de MREG arrivent simultanément, l'étude des plans a montré que le CTR était prioritaire sur le LSI, sans que le LSI le sache ; d'où des accidents qui se traduisent par des erreurs de transmission. Le LSI pouvait lire une valeur à l'adresse de MREG pointée non par lui, mais par le CTR (erreur de lecture du LSI) ou écrire à l'adresse de MREG pointée par le CTR.

Les priorités furent inversées afin de rendre le processeur lent prioritaire sur le processeur rapide, en interdisant tout accès du CTR à MREG quand le LSI fait une demande de lecture/écriture.

5.2.5.3. Conclusion.

Les expériences de simulation confirment la nécessité d'un filtrage d'adaptation en ce qui concerne les variables (force et position). En l'absence de filtrage (les coefficients du filtre A et B sont alors nuls), apparaissent des distorsions importantes. En particulier, un grésillement à 100Hz est très audible lors de la manipulation de la "Touche" dans l'expérience décrite en 5.1.2. Par contre, pour les paramètres, le filtrage d'adaptation semble, en pratique, sans importance.

Le processeur d'entrée/sortie du CTR filtre indifféremment les 6 voies d'entrée de MREG, sans tenir compte de ce qu'elles contiennent. Le filtrage d'adaptation demande un temps de calcul important. C'est pourquoi le nombre de voies d'entrée de MREG est limité à 6. Un filtrage ne concernant que les variables aurait sauvé du temps de calcul et permis d'augmenter le nombre de voie de communication entre partie lente et partie rapide.

Une version ultérieure du système CORDIS devrait :

- utiliser comme filtre d'adaptation un filtre qui ne soit pas un filtre récursif du deuxième ordre,
- séparer en deux catégories, variables et paramètres, les données communiquant entre simulation lente et rapide.

De façon générale, la communication entre ordinateur hôte et périphérique spécialisé pour la synthèse sonore constitue la pierre d'achoppement de beaucoup de systèmes de synthèse (cf A.2.4). Ce problème, dans le cadre du CTR, n'a pas été assez approfondi. L'interface LSI-CTR n'assure pas la gestion des conflits d'accès entre les deux machines. Un interface fonctionnant suivant le principe de l'accès direct mémoire aurait été préférable.

6. LA MAQUETTE CORDIS.

6.1. Contexte général.

6.1.1. Point de la situation.

La notion d'outil de création (cf A.4.5) conduit au système CORDIS, ensemble structuré de concepts. Cette notion se concrétise partiellement dans la maquette CORDIS, système pour la simulation des mécanismes instrumentaux en temps réel.

Cette maquette est un ensemble cohérent d'appareillages matériels et logiciels. Le terme de maquette est justifié par les limites de la modélisation et de l'algorithmique de CORDISV2, de l'ordinateur LSI et du processeur CTR. Il ne peut s'agir d'un outil de création utilisable à des fins de création effectives, mais bien plutôt d'un banc d'essai, étape préliminaire à la mise en oeuvre d'un outil de création véritablement opérationnel.

Certains éléments des travaux nécessaires à la fabrication de cette maquette ont été présentés dans les chapitres précédents.

6.1.2. Les étapes dans la construction d'un "outil de création".

L'ensemble des étapes qui conduit des concepts de CORDIS à un outil de création ou, en ce qui nous concerne, à la maquette CORDIS est illustrée par la figure 11.

Le système CORDIS propose une articulation du processus de création musicale selon trois catégories d'activités (ou modes) : le jeu, la construction de l'instrument, la composition (cf B.2.2).

Ces modes supposent une analyse du geste instrumental et des mécanismes instrumentaux qui se concrétise par des typologies. De la typologie du geste instrumental se déduit la conception d'un système de transducteurs d'où des directions pour la construction de transducteurs gestuels (cf B.3.1). La typologie des mécanismes instrumentaux conduit à choisir un triplet langage-modélisation-algorithmique, nécessaire pour représenter un mécanisme instrumental dans un système informatique (cf B.3.2.2, B.3.2.3, B.3.2.4). Ces choix déterminent un cahier des charges pour une configuration de processeurs. Pour la maquette CORDIS, les choix de modélisation et d'algorithmes sont ceux de CORDISV2. La configuration de processeurs est réduite à l'ordinateur hôte LSI 11 et au périphérique CTR.

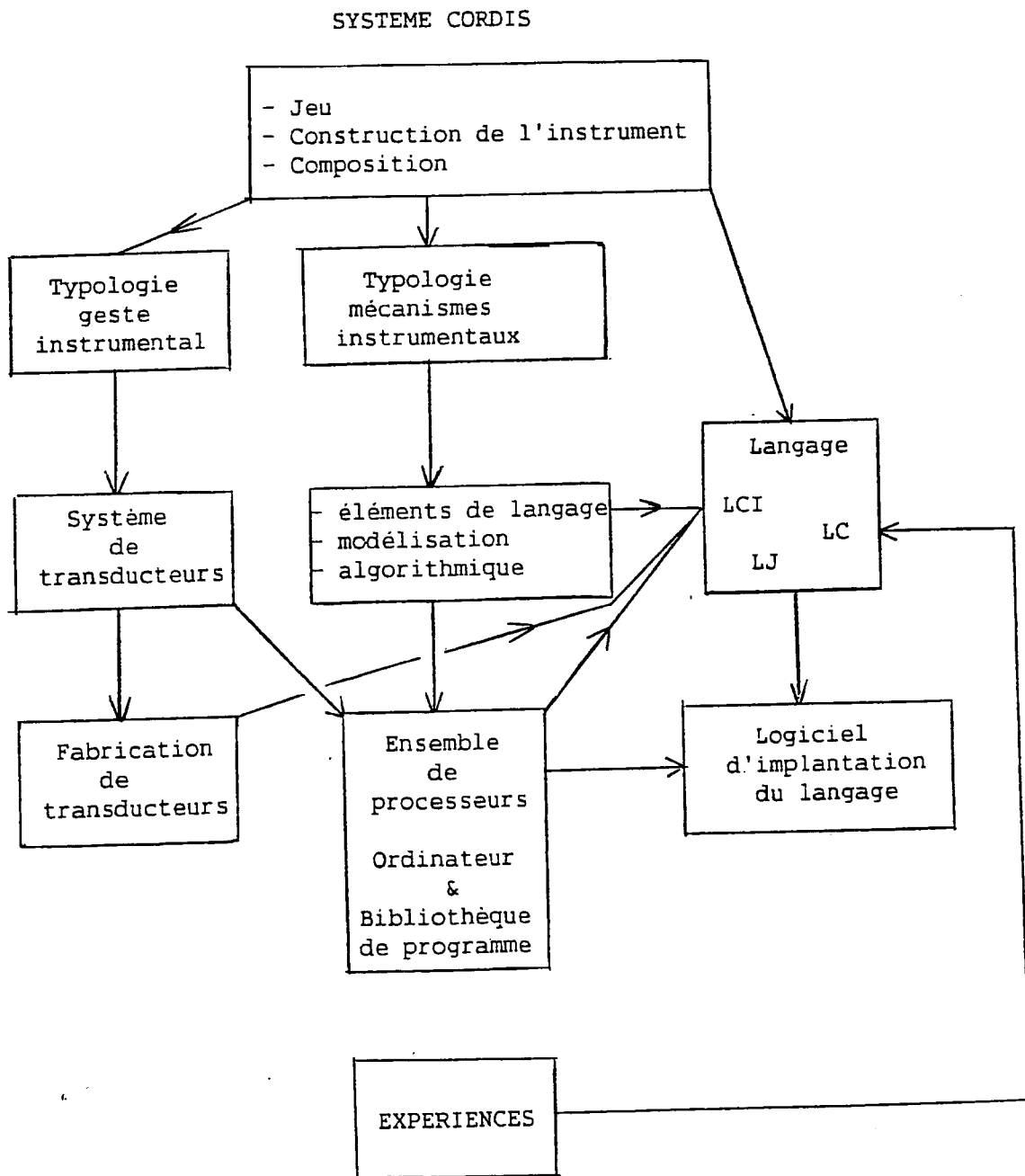


Figure 11

Le système CORDIS : aspects théoriques et réalisation pratique.

L'utilisateur ne peut utiliser l'outil de création informatique que s'il dispose d'un langage pour communiquer avec le système informatique. L'implantation du langage, sous forme d'un logiciel, est la touche finale qui confère au système informatique sa fonction d'outil de création.

6.1.3. Le langage.

Ce langage est partiellement déterminé :

- a) par l'existence des trois modes. Il est constitué de trois parties (ou sous-langages) et d'un langage de commande pour passer d'un mode à l'autre.
- b) Le sous-langage de construction de l'instrument (LCI), et le sous-langage de jeu (LJ) se définissent :
 - d'une part, à partir des éléments mécaniques représentés dans l'ordinateur (ces éléments dépendent des choix de modélisation),
 - d'autre part, à partir d'éléments de l'univers réel, en l'occurrence de la présence d'un opérateur humain agissant sur un ensemble de transducteurs gestuels.
- c) Certaines contraintes du système informatique (par exemple, dans le cas de la maquette CORDIS la décomposition d'une structure en partie lente et partie rapide) doivent être prises en compte par le langage.
- d) Le sous-langage de composition (LC) ne peut être défini entièrement a priori. Il dépend en partie des expériences instrumentales qui seront faites avec l'outil de création. Il est, par ailleurs, hors de question de proposer un langage de composition figé et général.

Dans le cadre de la maquette CORDIS, ce langage est dénommé Langage Cordis Temps Réel (en abrégé LCTR). Il est présenté au paragraphe 6.4.

Le langage fait l'objet d'une implantation. Le logiciel est construit à partir d'un langage de programmation et d'autres outils logiciels (logiciel graphique, bibliothèque de programme...). Dans le cas de la maquette CORDIS, ce logiciel est baptisé logiciel Cordis Temps Réel (en abrégé LCTR). Il est présenté en 6.5.

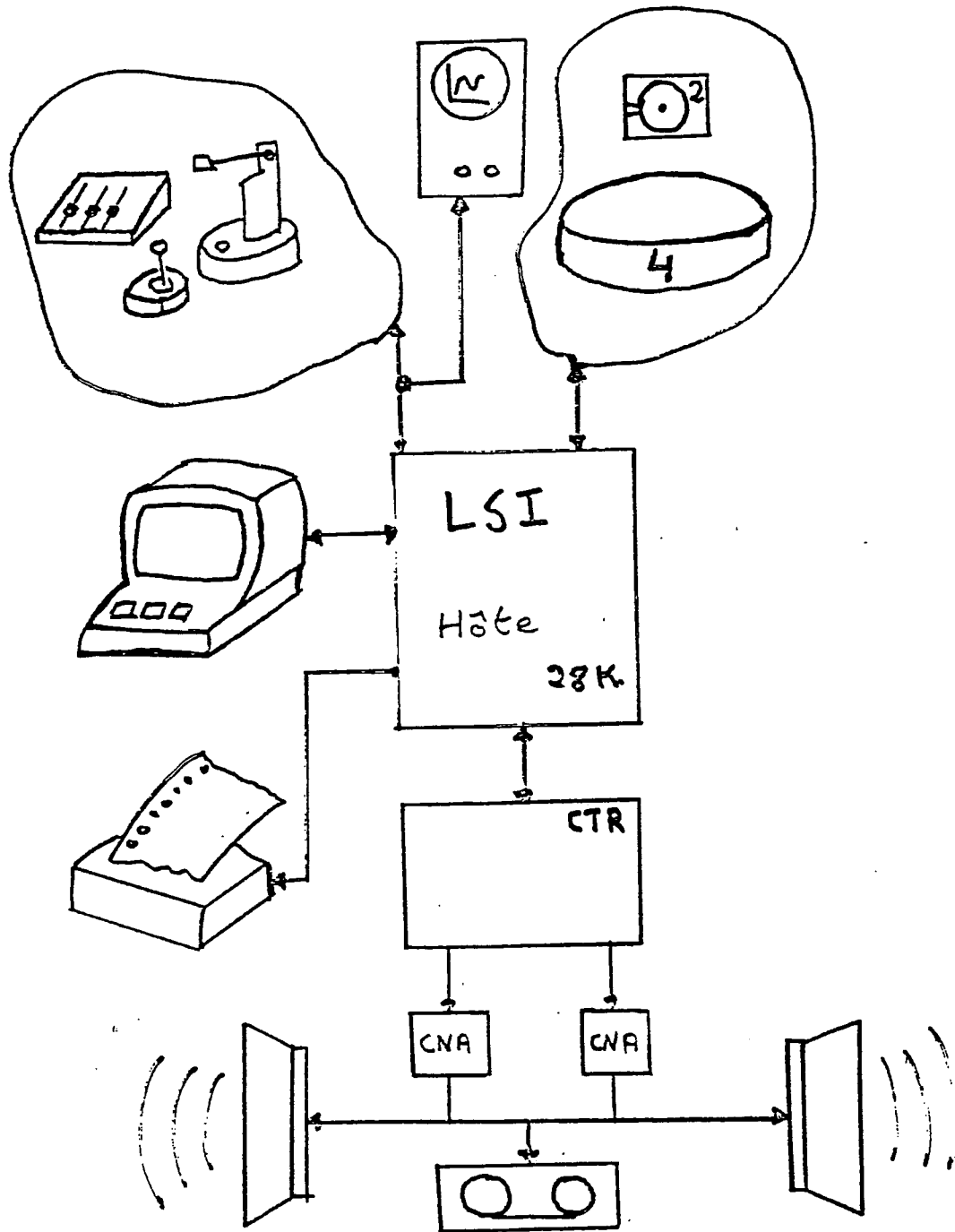


Figure 12

6.2. Contexte matériel de la maquette CORDIS.

L'ensemble de la configuration matérielle est illustré par la figure 12. Le LSI 11-02 est l'organe central du dispositif. Pratiquement, tous les éléments matériels seront actifs en mode jeu. Pour ce mode :

- la partie "lente" (cf B.4.2) d'un mécanisme instrumental est simulée dans le LSI.
- la partie "rapide" est, elle, simulée dans le CTR.

Concrètement, coexistent en parallèle deux boucles de calcul, l'une lente tournant à 100Hz, l'autre rapide tournant à la fréquence d'échantillonnage du CTR. Ces deux boucles de calcul échangent des informations.

Le LSI gère :

- les entrées/sorties avec les transducteurs (on dispose d'une série de 8 convertisseurs analogique/numérique),
- la communication avec les mémoires de masse, deux disques fixes et deux disques mobiles d'une capacité totale de 20 Mégaoctets, 2 unités de disquettes,
- le dialogue avec l'opérateur à l'aide d'une console de visualisation graphique (Secapa 741) et d'une imprimante (DEC LA120).

L'ensemble des transducteurs se compose, dans un premier temps, du transducteur gestuel rétroactif "Touche", et de trois transducteurs non rétroactifs, un potentiomètre se trouvant sur le support de la "Touche" et deux "joysticks". Cet ensemble pourra être étendu.

L'enregistrement direct des échantillons sonores n'est pas prévu dans cette maquette. Les sons ne peuvent être enregistrés qu'après la conversion numérique-analogique (par exemple à l'aide d'un magnétophone). Différents objets peuvent être observés sur oscilloscope (déplacement d'une partie d'un mécanisme instrumental, signaux issus des capteurs des transducteurs...).

6.3. Les trois modes de l'activité de création.

Ces modes ont été définis, lors de la présentation du système CORDIS (cf B.2.2). Pour l'utilisateur, ces modes recouvrent les aspects suivants :

Construction de l'instrument

Pour entrer dans le mode jeu, il faut une phase préparatoire. Jouer suppose, en effet, l'existence d'un ou plusieurs instruments(*). Ces objets devront être construits selon la modélisation des mécanismes instrumentaux choisie et la manière dont elle se concrétise dans le système informatique considéré.

La composition

On dispose d'instruments expérimentés en phase "JEU". Les actions gestuelles portant sur les instruments ont pu être mémorisées sous forme de "fichier de geste". Les gestes, codés sous forme de suite d'échantillons stockés dans des fichiers sont alors des objets appelés "gestes enregistrés". Un premier stade de la composition, qui vise à la construction d'un édifice sonore, consiste en un traitement de ces objets mémorisés (gestes et instruments).

Le jeu

L'utilisateur peut se trouver en phase de jeu pour une des quatre raisons suivantes :

- expérimentation d'un nouvel instrument dont les comportements sensibles sont inconnus,
- expérimentation d'un instrument déjà connu,
- exécution mixte : l'instrument est connu, certains jeux ont été mémorisés. Plusieurs gestes sont applicables simultanément sur l'instrument. Les expériences instrumentales, dénommées exécution mixte, combinent l'application simultanée de gestes préalablement enregistrés et de gestes effectués par l'opérateur.
- écoute d'une séquence produite par des "gestes enregistrés", sur des instruments ; l'expérimentateur est ici passif.

NB : les gestes non instrumentaux, du type de ceux d'un chef d'orchestre (gestes qui commandent des actions gestuelles) ne sont pas traités dans le cadre de la maquette CORDIS.

(*) Ce terme sera employé dans un sens précis dans le langage Cordis Temps Réel. Il a ici son sens commun.

6.4. Le langage Cordis temps-réel (LCTR).

6.4.1. Le sous-langage de construction de l'instrument (LCI).

Cette partie du langage donne les moyens à l'utilisateur de représenter les conditions matérielles de l'expérience instrumentale dans l'ordinateur. Autrement dit, ce langage permet de décrire :

- les mécanismes instrumentaux représentés (simulables) dans l'ordinateur,
 - la manière dont l'opérateur peut agir sur ces mécanismes.
- On parlera simplement de langage de "construction de l'instrument".

Le "LCI" doit tenir compte de deux univers : celui des objets représentés dans l'ordinateur et celui des objets réels, extérieurs à l'ordinateur, tels que transducteurs, opérateur humain... Il sera toujours question d'un seul opérateur humain ; la répartition des actions gestuelles entre différents partenaires n'est pas prise en compte par le langage "LCTR".

Présentation générale

Le "LCI" fonde dans un même formalisme les données de l'univers représenté et celles de l'univers réel. Le but du "LCI" est de construire des "ensembles d'instruments". Ces ensembles sont construits à partir d'"instruments", eux-mêmes fabriqués à partir de "constituants intermédiaires". Un constituant intermédiaire est construit à partir d'éléments.

6.4.1.1. Les éléments.

Ce sont les objets à la base de toute construction. On les appelle également les "modules". Ils regroupent les "modules de simulation" et les "modules opérateurs".

modules opérateurs / modules de simulation

Un module opérateur représente, dans l'ordinateur, un opérateur agissant sur un transducteur gestuel. Les modules de simulation sont les modules issus des choix de modélisation (cf B.3.2.2). Les modules opérateurs sont les éléments actifs, susceptibles d'apporter de l'énergie au système, les modules de simulation sont des éléments passifs.

modules lents / modules rapides

Si les éléments se subdivisent en modules de simulation et modules opérateurs, ils se divisent également, à cause de l'utilisation du CTR dans la maquette CORDIS, en modules rapides et modules lents (cf B.4.2).

modules matériels / modules de liaison

Enfin, dernière subdivision, les éléments sont de deux natures différentes. On distingue les modules matériels et les modules de liaison (cf B.3.2.3). Cette dernière distinction est fondamentale car elle sous-tend les règles de construction des instruments (voir en B.6.4.1.3 l'opération d'assemblage des éléments).

Ecriture

Chaque élément est décrit par un mnémonique unique et un ensemble de paramètres. Ces paramètres représentent des grandeurs mécaniques telles que raideur, frottement, longueur... Les modules sont classés par type ; il existe, en général, plusieurs modules de même type. A un type correspond un fonctionnement mécanique. Le type qualifie le module, les valeurs des paramètres le quantifient. Le mnémonique est constitué d'un code qui détermine le type du module et d'un identificateur (ici un nombre entier) le désignant à l'intérieur de ce type.

$e[Q_0, Q_1, \dots, Q_n]$ symbolise un élément dont le code est "e" et dont Q_0, Q_1, \dots, Q_n sont les paramètres. L'identificateur est éludé pour ne pas surcharger l'écriture. On parlera, par souci de simplification, d'élément de type "e".

6.4.1.2. La liste des éléments.

La liste ci-après fait l'inventaire des éléments de la maquette CORDIS en donnant, pour chaque élément :

- son code,
- la liste de ses paramètres.

Ce code et ces paramètres sont des termes du "LCI" que manipule l'utilisateur pour construire ses mécanismes instrumentaux.

MODULES RAPIDES

A chaque type de module rapide correspond bijectivement un type de module interne du CTR de même code. Le fonctionnement mécanique d'un module rapide de code "e" est celui du module interne du CTR de même code. Ces fonctionnements ont été décrits en B.4.5.2.

modules matériels

Il y a un seul type de module matériel, la cellule unitaire, de code "CEL".

CEL[k,z,xo,vo] symbolise un élément de type "CEL" ; les paramètres k,z,xo,vo représentent respectivement la raideur, le frottement, la position initiale, la vitesse initiale de la cellule.

modules de liaison

Il y a quatre types de liaison :

- le type liaison simple de code LIA.

LIA[k,z,lo] symbolise un élément de type liaison ressort/frottement ; les paramètres k,z,lo représentent la raideur, le frottement et la longueur initiale de la liaison.

- les liaisons conditionnelles qui sont de trois types :

UNL[k1,z1,k2,z2,l,l'] symbolise une liaison de type "unilatérale". k1 et z1 représentent la raideur et le frottement dans l'état1. k2 et z2 représentent la raideur et le frottement dans l'état2. l et l' représentent les paramètres de la condition.

ECH[k1,z1,k2,z2,l,l'] symbolise une liaison de type "échappement". Les paramètres ont même signification que pour le type "UNL".

CDX[k1,z1,k2,z2,num] symbolise une liaison de type "condition extérieure". Le symbole "num" désigne une touche du clavier de la télétype. En enfonçant en phase de "JEU" (*) cette touche, on change l'état de la liaison.

MODULES LENTS

Modules opérateur

Chaque module opérateur représente, on l'a dit, un opérateur agissant sur un transducteur gestuel. Le module opérateur contient toutes les informations relatives à cette action, nécessaires au système informatique. Le mnémonique d'un module opérateur est le mnémonique du transducteur qu'il représente. Le module opérateur représente cette action, quand elle a lieu, c'est-à-dire en phase "JEU".

Dans cette phase, l'action de l'opérateur est représentée par un "geste numérique". Par "geste numérique", on entend une suite d'échantillons obtenue à la sortie d'un convertisseur analogique-

(*) Ce type de geste n'est pas mémorisé dans le cadre de la maquette CORDIS

numérique, résultant d'un signal en provenance d'un capteur de transducteur gestuel. Chaque échantillon est codé sur 12 bits. Chacune de ces valeurs binaires, image d'un déplacement ou d'une force de l'univers réel, doit être interprétée comme un déplacement ou une force relatifs au système d'unité utilisé par les modules de simulation. Ce système d'unités est fixé par l'utilisateur quand il fabrique un "ensemble d'instruments" (cf ci-après B.6.4.1.7).

Tout module opérateur possède un paramètre, appelé "calibrage d'entrée", établissant cette relation selon :

$$X = \text{CAL} \cdot x$$
$$Y = a \cdot X$$

où

x est la valeur en mètre ou en newton de la grandeur physique à convertir,

CAL est la valeur sans dimension du paramètre "calibrage d'entrée",

X est une grandeur numérique intermédiaire,

Y représente le déplacement (resp. la force) de l'univers physique en unité utilisée par les modules de simulation.

Le réel a est le rapport entre l'unité du système MKSA et l'unité utilisée par les modules de simulation.

Ainsi, par exemple, une course d'un centimètre de la "Touche" peut être vue comme un déplacement d'un centimètre (CAL=1) ou d'un mètre (CAL=100).

TOUCH[CalE,CalS] symbolise le module opérateur représentant l'opérateur agissant sur la "Touche".

CalE est le paramètre de calibrage d'entrée.

CalS est un paramètre de calibrage jouant, pour l'effet rétroactif, un rôle symétrique à CalE.

Les trois autres modules opérateurs ne concernant que des transducteurs non rétroactifs, ils ont comme paramètre le seul "calibrage d'entrée".

PTOUCH[CalE] symbolise le module opérateur représentant l'opérateur agissant sur le potentiomètre placé sur la "Touche".

JOYST1[CalE] fait de même pour un premier joystick.

JOYST2[CalE] fait de même pour un second joystick.

La nature (matériel ou liaison) des modules opérateurs est fonction des modules de simulation auxquels ils sont attachés (voir en B.6.4.1.3 la définition d'une attache).

Modules de simulation lents

Ce sont les modules de CORDISV2 présentés en B.3.2.3 et sur la figure 6.

MAS[m,xo,vo] symbolise un module matériel lent de type masse. Les paramètres m,xo,vo représentent respectivement la masse, la position et la vitesse initiale de la masse.

CELL[m,k,z,xo,vo] symbolise un module matériel de type cellule. Les paramètres m,k,z,xo,vo représentent respectivement la masse, la raideur, le frottement, la position et la vitesse initiale de la cellule.

CEUL[k,z,xo,vo] symbolise un module matériel lent de type cellule unitaire. Sa masse est égale à un. Les autres paramètres ont même signification que ceux du type "CELL".

RES[k,lo] symbolise un module de liaison lente de type ressort. Les paramètres k,lo représentent respectivement la raideur et la longueur au repos du ressort.

FRO[z] symbolise un module de liaison lent de type frottement. Le paramètre z représente le frottement du module.

REF[k,z,lo] symbolise un module de liaison lent de type ressort/frottement. Les paramètres k,z,lo représentent respectivement la raideur, le frottement et l'élongation initiale du module.

Les liaisons conditionnelles lentes.

Dans le CTR, l'opérateur test câblé fixe à jamais le fonctionnement des liaisons conditionnelles rapides. Les liaisons conditionnelles lentes, simulées par programme dans le LSI, peuvent être définies de façon plus souple. CORDISV2 utilise tout un sous-langage (CADOZ 1982) pour la description des liaisons conditionnelles qui pourrait être repris dans le cadre d'une extension de la maquette CORDIS.

6.4.1.3. Actions sur les éléments.

Trois types d'actions se définissent sur l'ensemble des éléments, l'action d'attacher un élément (à un autre), l'action de contrôler des paramètres, l'action de placer un élément sur une sortie sonore.

a) Opération d'attache

Cette opération permet l'assemblage des éléments matériels et des éléments de liaison. Les éléments matériels sont les noeuds d'un réseau dont les arcs sont les éléments de liaison. Pour construire ce réseau, l'utilisateur fabrique une liste d'attaches. On définit :

Point d'attache

- Chaque élément matériel possède un point d'attache.
- Chaque élément de liaison possède deux points d'attache.
- Attacher un élément signifie relier un de ses points d'attache à d'autres points d'attache.

Règle d'attache

- On ne peut attacher ensemble deux éléments de même nature.
- Un point d'attache d'un élément de liaison ne peut être relié qu'à un seul point d'attache.
- On ne peut attacher des modules opérateurs entre eux.

Liste d'attaches

C'est la liste des attaches, c'est-à-dire la liste des couples formés par deux points d'attache reliés ensemble.

b) Contrôle des paramètres.

La position X_m d'un module matériel lent peut contrôler une ou plusieurs valeurs de paramètres des modules de simulation. Soit Q_i , un paramètre d'un module de simulation ; sa valeur en mode "JEU", est, par convention, calculée selon :

$$ClpQ_i - Q_{i0} = P_i.(X_m - X_{om}).$$

$ClpQ_i$ est la valeur du paramètre Q_i en mode "JEU",
 P_i est un nombre réel appelé coefficient de contrôle du paramètre Q_i ,
 X_{om} est la valeur du paramètre position initiale de l'élément matériel,
 X_m est la valeur de la position courante du module matériel en phase "JEU".
 Q_{i0} est la valeur du paramètre Q_i quand il n'est pas contrôlé.

Pour construire un contrôle de paramètre, l'utilisateur donne un doublet constitué par :

- le mnémonique du module matériel,
- une liste de triplets ; chacun d'eux se compose :
 - d'un mnémonique de module de simulation,
 - d'un paramètre de ce module,
 - d'un coefficient de contrôle.

Le nombre de triplets définit le degré de multiplicité du "contrôle de paramètre".

Une liste de contrôles de paramètres est une liste de tels doublets.

Remarquons que si un module opérateur est utilisé pour contrôler un paramètre, c'est alors un module matériel. Un contrôle de paramètre utilisant un module opérateur décrit les conditions d'un "geste de modulation" (cf B.2.1.1).

c) Sortie sonore

Cette dernière opération sur les éléments permet de décrire les sorties sonores en désignant ceux des modules matériels rapides qui seront écoutés sur une sortie stéréophonique. Le symbole "D" désigne la sortie droite, le symbole "G", la sortie gauche.

Une sortie sonore est la donnée d'un doublet :

- symbole "D" ou "G",
- liste de mnémoniques de modules matériels rapides.

Une liste de sortie sonore est faite de zéro, un ou deux doublets de ce type.

6.4.1.4. Les constituants intermédiaires.

Un constituant intermédiaire est un ensemble d'éléments sur lesquels sont définis :

- une liste d'attaches,
- une liste de contrôles de paramètre,
- une liste de sorties sonores.

Un instrument est un constituant intermédiaire particulier :

- tous ses points d'attache sont attachés,
- il possède un module opérateur représentant l'expérimentateur effectuant un geste d'excitation.

L'ensemble des instruments est un sous-ensemble de l'ensemble des constituants intermédiaires.

6.4.1.5. Les ensembles d'instruments.

Dans le mode "JEU", la situation générale consiste en des actions sur plusieurs instruments. C'est à cette fin qu'est définie la notion d'ensemble d'instruments. Un ensemble d'instruments est un triplet composé :

- d'une liste d'instruments,
- d'un module connecteur,
- d'un système d'unités.

Ces deux derniers objets, qui établissent les jonctions entre l'univers réel et celui représenté dans le système informatique, sont définis dans les deux sous-chapitres suivants.

L'ensemble d'instruments est le seul type d'objets du "LCI" qui conduise à un objet, expérimentable dans le mode "JEU". Les constituants intermédiaires et les instruments sont des étapes destinées à faciliter la construction des ensembles d'instruments. C'est au niveau de l'ensemble d'instruments qu'apparaissent les contraintes matérielles de la maquette CORDIS.

Ainsi, l'ensemble des éléments réunis dans la liste d'instruments d'un ensemble d'instruments ne doit comporter :

- qu'un seul exemplaire de chaque module opérateur,
- au plus 32 modules de type "CEL",
- au plus 32 modules de type "LIA"
- au plus 32 modules de liaisons conditionnelles rapides dont au mieux 8 de type "CDX".

Le nombre d'attaches entre éléments lents et éléments rapides, le nombre et les degrés de multiplicité des contrôles de paramètres d'élément rapides, sont limités par la structure de la mémoire MREG du CTR (cf B.4.4.4).

A ces restrictions dues à des facteurs non temporels, unicité des transducteurs, architecture du CTR, s'ajoute la contrainte du temps réel. La boucle lente et la boucle rapide ne peuvent simuler qu'un nombre fort limité de modules. (Le CTR ne permet pas de simuler le pincement d'une "corde" formée par 12 modules de type "CEL" et 11 modules de type "LIA", à la fréquence d'échantillonnage rapide de 25,6kHz).

6.4.1.6. Les connecteurs.

Les transducteurs gestuels ne sont pas relié de façon permanente aux convertisseurs. Le nombre de voies de ces derniers constitue un goulet d'étranglement limitant le nombre de transducteurs utilisables simultanément.

Le connecteur est un ensemble de fils de connexion sélectionnant p transducteurs parmi n disponibles ; il assure le transfert :

- des signaux analogiques issus des sorties des capteurs des p transducteurs vers les convertisseurs analogique/numérique,
- des signaux analogiques issus des convertisseurs numérique/analogique vers les p transducteurs.

On dit que le connecteur couvre l'ensemble des p transducteurs.

L'utilisateur doit placer un connecteur sur la face avant du boîtier contenant les convertisseurs, pour pouvoir jouer d'un ensemble d'instruments.

Le connecteur, objet matériel, possède une représentation sous forme logicielle, de la même façon qu'à un transducteur gestuel correspond un module opérateur le représentant. Cette représentation est appelée module connecteur. Un module connecteur consiste en :

- un ensemble non ordonné de mnémoniques de modules opérateurs,
- pour chaque module opérateur, la donnée des numéros de voies physiques des convertisseurs numérique-analogique et analogique-numérique sur lesquelles sont reliées les entrées/sorties du transducteur qu'il représente. On parlera d'un module connecteur couvrant un ensemble de modules opérateurs.

Remarques

Pour un sous-ensemble de transducteurs donné, il existe plusieurs manières d'affecter les voies des convertisseurs aux entrées/sorties des transducteurs. Deux connecteurs sont dits équivalents lorsqu'ils couvrent les mêmes transducteurs. L'utilisateur n'aura besoin que d'un représentant de chaque classe d'équivalence.

Soit un ensemble d'instruments dont "la liste d'instruments" regroupe les modules opérateurs P_1, P_2, \dots, P_n . Le module connecteur de cet ensemble d'instruments doit couvrir au moins les modules opérateurs P_1, P_2, \dots, P_n . L'ensemble d'instruments n'est pas expérimentable en phase "JEU" si cette condition n'est pas réalisée.

6.4.1.7. Le système d'unités.

Il permet d'établir la correspondance entre les unités utilisées par le système informatique pour les calculs des comportements des modules de simulation et les grandeurs physiques réelles définies dans le système "MKSA". Par exemple :

- l'unité de masse, implicite lorsqu'il est question de cellule unitaire, doit être définie par rapport au kilogramme,
- les positions, calculées par le CTR dans un format virgule fixe avec 23 bits de mantisse doivent être appréciées par rapport au mètre.

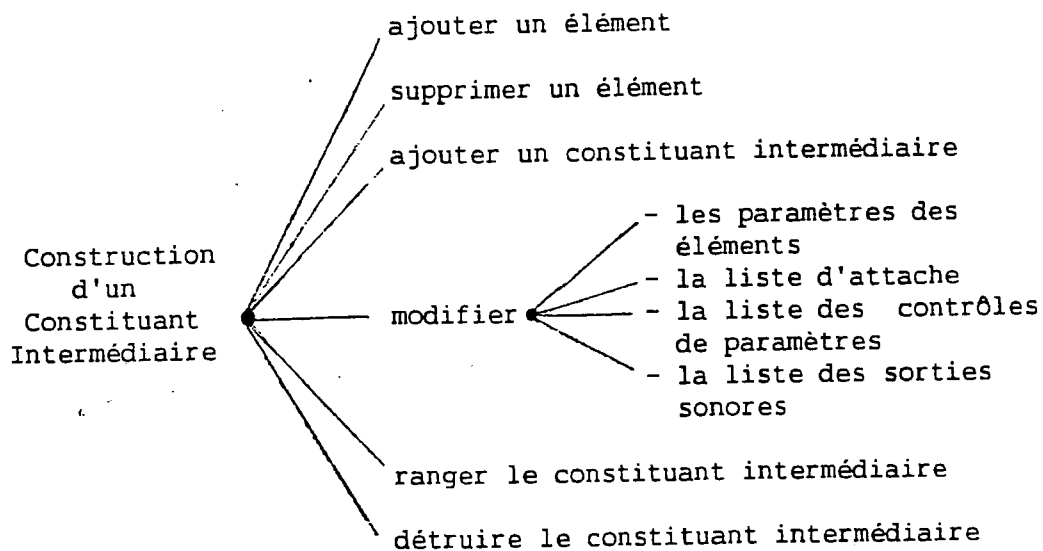
Trois valeurs réelles définissent un système d'unités :

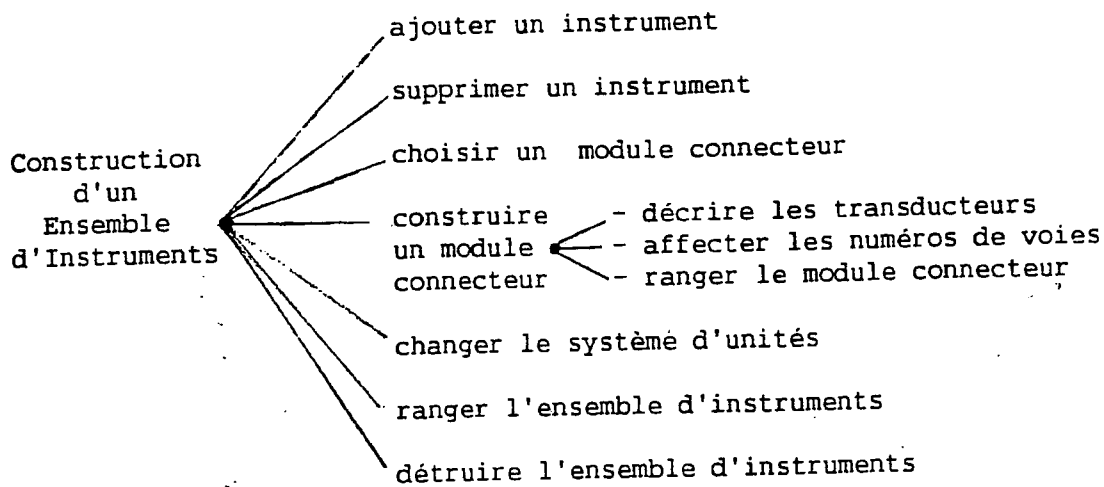
- un coefficient de longueur définissant l'unité de longueur du système informatique par rapport au mètre,
- un coefficient de masse définissant l'unité de poids du système informatique par rapport au kilogramme,
- la valeur de la fréquence d'échantillonnage rapide. qui conditionne les valeurs des paramètres de raideur et frottement numériques (cf B.3.2.4).

6.4.1.8. Le mode opératoire dans la construction de l'instrument.

Les différents objets, éléments, constituants intermédiaires, connecteur, ensemble d'instruments, utilisés pour construire un instrument viennent d'être présentés. La liste des actions exécutables sur ces objets et la manière dont ces actions sont effectuées constituent le mode opératoire.

Il existe en tout, deux actions principales qui se divisent en actions secondaires. Cette articulation se synthétise par le schéma ci-dessous :





L'utilisateur dispose d'une "liste", de deux "placards" et d'un "éta bli". La "liste" est celle des codes des éléments, le premier "placard" contient les constituants intermédiaires, le second les ensembles d'instruments. A chaque constituant et chaque ensemble est attribué un nom qui en permet l'identification et, par là, l'utilisation. L'"éta bli" est le lieu où l'opérateur construit soit un constituant intermédiaire, soit un ensemble d'instruments.

Construction d'un constituant intermédiaire

Sur l'éta bli est disposé un constituant intermédiaire par défaut. L'utilisateur peut poser sur l'éta bli des constituants intermédiaires ou des éléments supplémentaires.

- Pour poser N éléments d'un type donné, il donne N et pointe le code du type qu'il désire dans la liste. N éléments, avec des valeurs par défaut de leurs paramètres apparaissent alors sur l'éta bli.

- Pour poser un constituant intermédiaire, il suffit d'en donner le nom. Le constituant est trouvé dans le premier placard, dupliqué (*), puis posé sur l'éta bli.

(*) Cette duplication est en fait une opération assez complexe. Elle modifie, par type, les identificateurs des modules de simulation du constituant dupliqué de façon à ce qu'ils soient distincts de ceux existants déjà sur l'éta bli. Si un module opérateur est présent à la fois sur l'éta bli est dans le constituant, il n'est pas posé sur l'éta bli.

L'utilisateur agit sur les éléments posés sur l'établi ; il peut en supprimer, les attacher, changer les valeurs de leurs paramètres, définir des contrôles de paramètres et des sorties sonores.

Pour ranger le constituant présent sur l'établi, l'utilisateur lui donne un nom. Le constituant est retiré de l'établi et placé dans le premier placard. Si le constituant est jugé inutile, l'utilisateur peut le supprimer de l'établi. Tant qu'une de ces deux décisions n'a pas été prise, l'établi reste en l'état.

Construction d'un ensemble d'instruments

La liste d'instruments d'un ensemble d'instruments est décrite par la liste des noms des instruments. Ajouter ou supprimer un instrument s'effectue en ajoutant ou supprimant un nom de cette liste.

Le choix d'un connecteur se fait en donnant le nom du connecteur. S'il n'existe pas de connecteur couvrant l'ensemble des transducteurs représentés dans l'ensemble d'instruments, il faut en construire un matériellement puis construire le module connecteur le représentant en spécifiant :

- l'ensemble des transducteurs couverts à l'aide des mnémoniques des modules opérateurs,
- les numéros de voies des convertisseurs pour chaque transducteurs,

Il faut enfin ranger le module connecteur sous un nom, pour qu'il soit utilisable.

Le choix d'un système d'unités se fait en modifiant les coefficients du système d'unités attachés par défaut à tous les ensembles d'instruments.

Un ensemble une fois construit doit être rangé sous un nom, faute de quoi, il est automatiquement détruit.

6.4.2. Le sous-langage de jeu (LJ).

Cette partie du langage permet à l'utilisateur de donner ses consignes pour la phase "JEU". Les objets dont peut jouer l'expérimentateur sont de deux types :

- L'ensemble d'instruments est le type d'objet résultant de la phase de "construction de l'instrument".
- La "registration" est le type d'objet résultant de la phase de composition telle qu'elle existe dans le "LCTR" (cf B.6.4.3).

Le déroulement d'une séquence de jeu d'une registration sera explicité quand ce terme aura été défini (cf B.6.4.3).

6.4.2.1. Les dispositions de jeu.

La manière dont un ensemble d'instruments est expérimenté dépend de "dispositions de jeu". Ces dispositions s'appliquent aux modules opérateurs de l'ensemble d'instruments ; à chacun de ces modules est affectée une disposition de jeu.

Ces dispositions sont prises juste avant le jeu effectif. Une fois les dispositions de jeu prises, l'ensemble d'instruments est transformable en une réalité sensible, en un objet expérimentable par les sens sonore, visuel et tactilo-kinesthésique.

La phase de jeu se divise en deux étapes successives : une phase de préparation au jeu et une phase de "jeu effectif".

On distingue trois dispositions de jeu : le jeu direct, le jeu enregistré, la lecture.

Le jeu direct

Le symbole "D" désigne le jeu direct. Un module opérateur, une fois affecté par cette disposition, représente l'opérateur agissant en direct, à l'instant présent, sur les transducteurs gestuels. En phase de jeu effectif, quand l'opérateur humain applique un geste sur un transducteur ; celui-ci est directement transmis au mécanisme instrumental simulé. Le jeu direct est similaire au jeu d'un instrument traditionnel.

Le jeu enregistré

Le symbole représentant cette disposition de jeu est "E". C'est un "jeu direct" avec une propriété supplémentaire : un module opérateur, affecté de cette disposition, mémorise l'image numérique du geste effectué sur le transducteur. On parlera simplement de "geste enregistré".

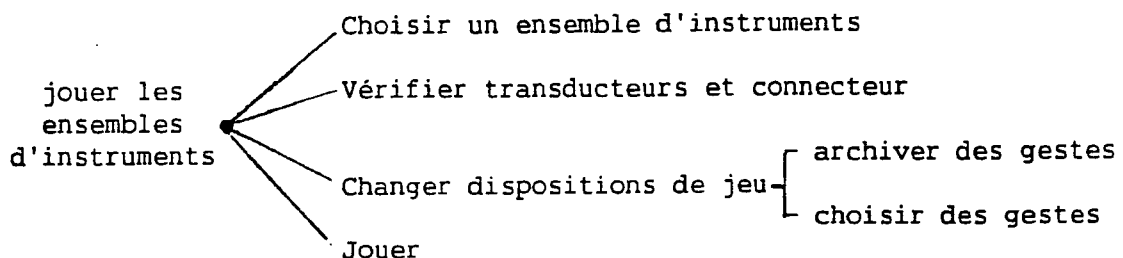
La lecture

Le symbole "L" désigne cette disposition. Le module opérateur représente l'opérateur agissant dans le passé sur le transducteur.

Quand la disposition de jeu d'un module opérateur est la lecture, l'opérateur observe, dans la phase de jeu effectif, une action qu'il a effectuée antérieurement. L'enregistrement permet à l'opérateur d'avoir une vision extérieure de lui-même. Si certains modules opérateurs sont affectés de la disposition "L" et d'autres de la disposition "D", l'opérateur est en quelque sorte dédoublé dans la phase de "jeu effectif". Il agit et, si l'on peut dire, un autre lui-même agit en même temps.

6.4.2.2. Le mode opératoire pour jouer d'un ensemble d'instruments.

L'ensemble des actions à effectuer pour jouer d'un ensemble d'instruments se résume par le schéma ci-dessous :



Les deux actions de préparation au "jeu effectif" se succèdent. Elles consistent :

- à choisir un ensemble d'instruments ; l'utilisateur précise le nom de l'ensemble d'instruments dont il veut jouer.
- à vérifier la présence matérielle, en bonne place des transducteurs et du connecteur. Il doit y avoir cohérence entre les modules de l'univers représenté (modules opérateurs, module connecteur) et les objets de l'univers réel (transducteurs, connecteur).

Les modules opérateurs des ensembles d'instruments sont affectés par défaut de la disposition "jeu direct". Cette affectation permet alors à l'utilisateur de jouer en "direct" de l'ensemble d'instruments qu'il a préalablement choisi.

L'opérateur peut interrompre sa séquence de jeu pour changer les dispositions de jeu. En cas de "jeu enregistré", l'enregistrement sera conservé si l'opérateur lui donne un nom en permettant l'archivage. En cas de "lecture", le "geste enregistré" utilisé est choisi à l'aide de son nom.

6.4.3. Le sous-langage de composition (LC).

6.4.3.1. Introduction.

La phase de composition consiste à manipuler les objets élaborés lors des deux phases déjà décrites. Le contexte matériel et logiciel de la maquette CORDIS ne permet d'envisager que des manipulations très simples. Il existe trois catégories de manipulations :

- la manipulation des instruments,
 - la manipulation des gestes,
 - la manipulation consistant à appliquer des gestes à des instruments.
- Une "composition" est un agencement d'"ensemble d'instruments" et de gestes effectués dessus. Elle est construite à partir de ces manipulations.

L'utilisateur dispose déjà d'un outil pour manipuler les "ensembles d'instruments" (cf B.6.4.1). Rappelons que cet outil ne prend pas en compte l'existence de plusieurs opérateurs ni le détail des organes agissants (bras, auriculaire...).

La manipulation des gestes demanderait la définition d'un langage particulier appelé "éditeur de geste". Celui-ci devrait permettre de ralentir, accélérer, amplifier ou atténuer, modifier les "gestes enregistrés", voire, au vu des connaissances acquises avec les "gestes enregistrés" permettre d'envisager la fabrication de gestes de toutes pièces. Il devrait également gérer la bibliothèque de gestes. L'aspect "éditeur de gestes" n'est pas approfondi pour la maquette CORDIS :

- Les gestes dont dispose l'utilisateur se limitent aux "gestes enregistrés". Cette réduction est de toute manière le passage obligé pour l'apprentissage de "l'outil de création". Il faut commencer par manipuler ce qui est connu, ce qui a été expérimenté, avant d'envisager des extrapolations.
- Une des fonctions d'un "éditeur de geste" existe dans la maquette CORDIS ; le paramètre de "calibrage d'entrée" permet de modifier l'amplitude d'un geste.

Dans l'absolu, il faudrait que l'utilisateur puisse :

- construire un ensemble d'instruments composé d'un très grand nombre d'instruments,
- choisir, sur chaque instrument, s'il opère directement en s'aidant des transducteurs ou s'il utilise des gestes enregistrés,
- se servir, à tout instant, de tous les instruments à la fois.

La notion de composition est ici limitée à la notion de "registration". Toute composition n'est pas une registration. La registration est le type de composition envisageable dans le cadre de la maquette CORDIS.

6.4.3.2. La registration.

Une registration est une série limitée arbitrairement à 10 registres. Un registre est un couple formé d'un ensemble d'instruments et de dispositions de jeu sur cet ensemble. Quand on joue d'une registration, l'utilisateur parcourt les registres en disposant de commandes pour passer au registre suivant, ou retourner au registre précédent.

Deux registres sont dits compatibles quand leurs ensembles d'instruments peuvent être affectés du même connecteur, appelé alors "connecteur commun". Une registration est une série de registres compatibles.

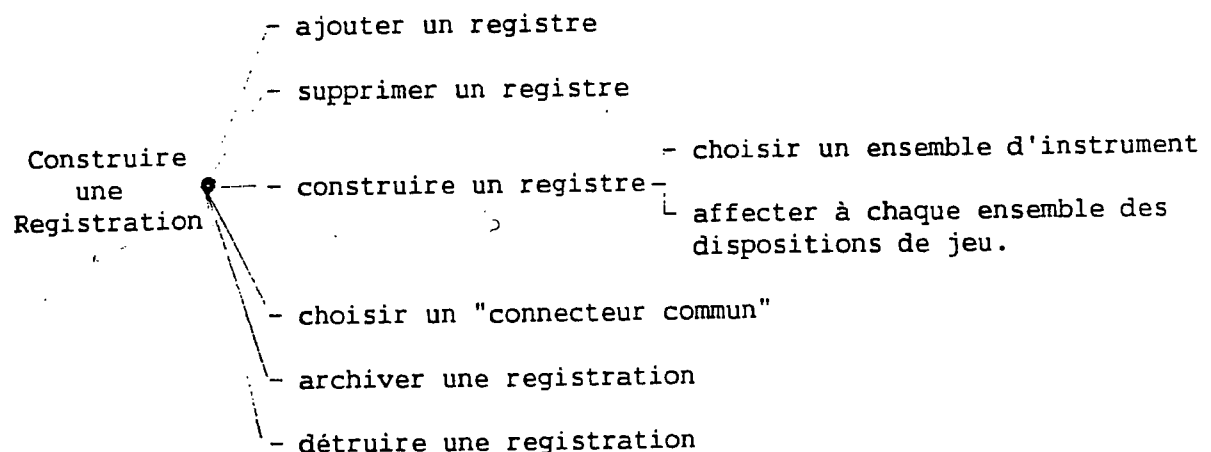
L'intérêt de la registration est de permettre la comparaison et l'enchaînement de deux registres. Une registration peut conduire :

- à jouer d'un même ensemble d'instruments avec successivement des dispositions de jeu différentes,
- de jouer avec les mêmes dispositions de jeu (en particulier les mêmes gestes enregistrés) successivement sur deux ensembles d'instruments différents.

Ces comparaisons nous apparaissent comme une étape logique et fondamentale dans l'apprentissage de l'outil de création.

6.4.3.3. Le mode opératoire.

L'ensemble des actions définies autour de la notion de registration se résume par le schéma suivant :



On supprime un registre en donnant le nom de l'ensemble d'instruments qui le constitue. La modification des dispositions de jeu se fait comme en phase de "jeu d'un ensemble d'instruments" (cf B.6.4.2.2).

6.4.3.4. Jeu d'une registration.

On distingue, comme pour le jeu d'un ensemble d'instruments deux phases :

- La phase de préparation consiste à choisir une registration et vérifier le "connecteur commun" à tous les ensembles d'instruments.
- La phase de "jeu effectif" consiste à agir sur les transducteurs dont les modules opérateurs sont affectés de la disposition "jeu direct" ou "jeu enregistré", et, à frapper sur le clavier de la télétype les commandes qui permettent de changer de registre.

La commande "B" permet de reculer d'un registre.

La commande "N" permet de recommencer les actions sur le registre courant.

La commande "M" permet d'avancer d'un registre.

Lorsque l'on joue du premier registre d'une registration, la commande "B" est équivalente à la commande "N". Quand on joue du dernier registre d'une registration, la commande "M" permet de jouer sur le premier registre.

6.4.4. Le langage de commande.

Le langage de commande pour passer d'un des modes, "Construction de l'Instrument", "JEU", "Composition", à un autre est très simple. Il consiste en trois commande, chacune désignant un des modes. Quand cette commande est utilisée, on passe dans le mode qu'elle désigne.

- La commande "C" symbolise le mode "Composition".

- " " "I" " " "Construction de l'Instrument".

- " " "J" " " "JEU".

6.5. Le logiciel Cordis temps-réel (LCTR).

6.5.1. Introduction.

Le logiciel Cordis temps-réel est un programme qui permet à l'ordinateur de comprendre le langage Cordis temps-réel. Ce programme comporte deux parties distinctes :

- La "partie dialogue" traite le dialogue avec l'utilisateur. Elle permet la fabrication de descriptions de constituants intermédiaires, ensembles d'instruments, modules connecteurs, registrations, et l'affectation de dispositions de jeu.
- La "partie calcul" interprète le langage "LCTR". Elle assure, à partir de ces descriptions, la construction effective des objets utilisés en phase "JEU". Elle génère l'ensemble des données nécessaires pour faire les calculs de simulation des mécanismes instrumentaux.

Les caractéristiques principales de ces deux parties sont présentées ci-après. Deux notices internes les présentent plus complètement ; la première est le manuel d'utilisation du "LCTR", la seconde détaille l'architecture et le fonctionnement du programme proprement dit.

6.5.2. La partie dialogue du LCTR.

Cette partie renvoie au problème général du dialogue homme-machine qui constitue un domaine d'étude en soi. Le "LCTR" se borne à utiliser des outils déjà existants sans proposer de concepts nouveaux. Les conditions du dialogue homme-machine peuvent toujours s'améliorer. Il faut s'arrêter à une version qui soit un bon compromis entre :

- l'obtention de conditions de dialogue suffisamment agréables pour l'utilisateur,
 - le temps de réalisation nécessaire pour construire le programme,
 - les résultats attendus de l'utilisation du programme.
- Construire un outil de dialogue exceptionnel est inutile si les applications attendues offrent un intérêt limité.

6.5.2.1. Les outils logiciels disponibles.

Aimé RAZAFINDRAKOTO(1985) a construit un logiciel graphique de base, ANIGRAPH, adapté à notre ordinateur LSI 11-02 (32K mots de mémoire centrale). ANIGRAPH permet la manipulation de menus, matrices et messages. Ce logiciel est écrit partie en langage Pascal, partie en Assembleur.

Le langage choisi pour réaliser cette partie "dialogue" est le langage Pascal. Ce langage permet de manipuler aisément des "listes" d'objets. Un constituant intermédiaire sera une liste d'éléments ; l'ajout d'un élément correspond à une insertion dans la liste... Des manipulations de ce type sont des actions très courantes du "LCTR".

6.5.2.2. Une contrainte matérielle.

L'affichage en entier d'un constituant intermédiaire sur l'écran du terminal graphique Secapa 741 se révèle être impossible. L'écran est trop petit !

On introduit alors une contrainte supplémentaire au cahier des charges. Un constituant intermédiaire est découpé en quatre groupes distincts : le premier formé des éléments matériels rapides, le second des éléments de liaison rapides, le troisième des éléments matériels lents, le dernier des éléments de liaison lents. L'utilisateur demande l'affichage d'un des groupes du constituant intermédiaire.

Pour simplifier, on décide que tous les modules opérateurs sont des modules matériels lents.

6.5.2.3. Représentation des objets du "LCI".

Il s'agit de montrer quel est le système de symboles graphiques et alphanumériques utilisé pour représenter constituants intermédiaires, ensembles d'instruments, connecteurs, registration..

Constituant intermédiaire

La figure 13a décrit un constituant intermédiaire particulier. il s'agit d'un instrument très simple représentant la situation suivante : l'utilisateur tient un plectre, constitué par la "Touche" et une liaison conditionnelle de type échappement, permettant le pincement d'une "corde" faite ici d'une seule cellule (cf B.3.2.5). La figure 13a est obtenue lorsque l'utilisateur demande une impression sur l'imprimante LA120 d'un constituant intermédiaire. La présentation sur imprimante est, pour chacun des groupes, la même que celle sur l'écran de la Secapa.

Chaque groupe d'un constituant est un tableau qui prend la forme d'une matrice. Les groupes concernant les liaisons contiennent les informations sur les attaches existantes entre les éléments. Chaque ligne d'une matrice décrit complètement un élément. Certaines colonnes correspondent aux valeurs des paramètres, les autres contiennent les informations relatives aux sorties sonores, aux attaches et aux contrôles de paramètres.

Constituant intermédiaire INSTB :

* éléments matériels rapides

	Xinit	Vinit	Kcel	Zcel	S.sonore
CEL 01	0	0	0,01	0,0001	droite

* éléments liaisons rapides

	atach1	atach2	K/K1	Z/Z1	K2	Z2	L/NumCDX	L'
ECH 01	TOUCH	CEL 01	0,1	0,2	0	0	80	-8

* éléments matériels lents

	masse	Xinit	Vinit	K/CalE	Z/CalS	CLP	COEFCLP
TOUCH	-	0	0	5	1	-	-

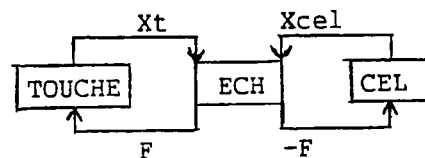
Figure 13a

Ensemble d'instruments EITB :

* liste des instruments : INSTB.

* connecteur associé : 1

Figure 13b



UNITES

Longueur 0,00100 m

Masse 0,00010 kg

Freq.ech 25,600 kHz

Figure 13c

Connecteur 1

	Voie entrée	Voie sortie
TOUCH	0	0

Figure 13d

Le nombre de colonnes affichables sur la Secapa est limité. Certaines des colonnes contiennent quelquefois deux sortes de paramètres. Dans le cas des modules matériels lents, par exemple, les nombres de la quatrième colonne correspondent soit à des valeurs de raideur s'il s'agit de modules de simulation (type "CELL" ou "CEUL"), soit à des valeurs de "calibrage d'entrée" s'il s'agit de modules opérateurs.

Ensemble d'instruments

La figure 13b décrit un ensemble d'instruments constitué du seul instrument décrit ci-dessus.

Connecteur

La figure 13c décrit le connecteur numéro 1 constitutif de l'ensemble d'instruments de la figure 13b

6.5.2.4. Remarques.

D'autres niveaux d'interactivité sont à envisager pour permettre à l'utilisateur de définir les valeurs des paramètres des éléments. Dans l'état actuel du "ICTR", l'utilisateur fixe par un nombre réel chaque valeur de paramètre. Il serait souhaitable qu'il puisse modifier les paramètres par famille (par exemple toutes les raideurs des modules de liaison...), qu'il puisse donner des formules mathématiques pour calculer des valeurs...

Par ailleurs, la manipulation directe des valeurs numériques n'est pas des plus commodes ; le risque d'erreurs de frappe des chiffres au clavier est non négligeable. L'utilisateur devrait avoir à sa disposition des potentiomètres ou des curseurs dont les positions donneraient les valeurs des paramètres.

6.5.3. La partie "calcul" du "ICTR".

A partir des descriptions obtenues dans la phase de dialogue, cette partie assure la construction effective des ensembles d'instruments et des registrations afin que l'utilisateur puisse en jouer. Elle se décompose en trois :

- génération des "codes" pour le processeur CTR,
- écriture des modules de calcul des éléments lents,
- fabrication et gestion de la boucle de jeu.

6.5.3.1. La génération des codes pour le CTR.

Elle consiste, à partir de la description des modules matériels rapides, des modules de liaison rapides, des attaches entre éléments lents et éléments rapides, des contrôles de paramètres des modules rapides et de la liste des sorties sonores, à fabriquer le programme pour le CTR et l'ensemble des paramètres à charger dans ses mémoires. Les instructions du programme et les paramètres sont regroupés sous le nom de "codes" pour le CTR. Le deuxième niveau de logiciel du CTR (cf B.5.1.3) est alors utilisé pour charger les codes dans le CTR.

6.5.3.2. Ecriture des modules de calcul des éléments lents.

Ces modules de calcul sont l'équivalent pour l'ordinateur hôte LSI des microprogrammes du CTR. Il y a trois sortes de modules de calcul :

- a) Les modules de calcul des modules de simulation lents ("MAS", "CELL"...); ils calculent l'algorithme de ces modules.
- b) Les modules de calcul correspondant aux modules opérateurs assurent, selon la disposition de jeu affectée aux transducteurs :
 - la numérisation des gestes effectués par l'opérateur sur le transducteur,
 - le traitement de ce signal (calibrage d'entrée),
 - si le module opérateur représente un transducteur rétroactif, l'envoi, en retour, via les convertisseurs numérique-analogique de la réaction des modules de simulation liés aux modules opérateurs,
 - la mémorisation ou la lecture du geste numérique.
- c) Les modules de transfert assurent le passage et les conversions de format des données des modules de calcul lents vers la mémoire "MREG" du CTR.

L'ensemble de ces modules de calcul est écrit en langage Assembleur afin de rendre leur exécution la plus rapide possible.

6.5.3.3. Fabrication et gestion de la boucle de jeu.

Il s'agit de fabriquer, en fonction de la description de l'ensemble d'instruments et des dispositions de jeu qui lui sont affectées, la séquence d'instructions d'appel aux différents modules de calcul de simulation lente.

Cette séquence est en phase de "jeu effectif", exécutée périodiquement à la fréquence de 100Hz. Elle constitue la boucle de

calcul lent. Une deuxième boucle, dite de calcul rapide, s'exécute dans le CTR. L'ensemble de ces deux boucles, fonctionnant en parallèle, constitue la boucle de calcul. Cette dernière est interrompible par la frappe d'une touche du clavier de la télétype correspondant à une commande du Langage Cordis Temps-Réel.

La description est faite dans un environnement écrit en langage Pascal. Les modules de calcul sont écrits en langage Assembleur. Cette partie du programme calcule un certain nombre d'adresses mémoire afin de communiquer les paramètres des éléments entre les parties de programme écrites en Assembleur et celles écrites en Pascal.

6.5.4. Les étapes dans la réalisation du "ICTR".

La version du langage Pascal la plus performante dont nous disposons est le PascalV2 distribué par Oregon Software. Le logiciel ANI-GRAPH (cf B.6.5.2.1) ainsi que les deux premiers niveaux de logiciel du CTR (cf B.5.1.3) étaient écrits en PascalV1. La conversion de PascalV1 en PascalV2 fut effectuée moyennant quelques modifications des programmes sources.

La détermination de la structure de données du programme et l'analyse des différentes procédures du "ICTR" ont pu être menées à bien grâce au travail réalisé en commun avec Aimé RAZAFINDRAKOTO. Ce travail commun s'est poursuivi pour aboutir à l'écriture d'une première version de la partie du programme correspondant au langage de construction des instruments et à la mise en oeuvre du fonctionnement de la boucle de jeu.

Après une première phase de mise au point et l'écriture des procédures correspondant aux "dispositions de jeu", est obtenu un premier test complètement satisfaisant : La manipulation de pincement d'une "corde" de 8 masses, aboutissement des premiers tests globaux du CTR (cf B.5.1.2), est opérationnelle avec ce nouveau programme. On dispose en plus, cette fois-ci, des possibilités de mémorisation et de lecture des gestes.

Le "ICTR" est dès lors utilisable pour la simulation de n'importe quelle structure rapide c'est-à-dire :

- la construction de mécanismes représentés par des modules opérateurs et des modules rapides,
- le jeu d'ensembles d'instruments constitués de tels mécanismes.

Les points suivants n'ont pu être abordés :

- mise au point des procédures liées aux simulations des modules de simulation lents,
- écriture des procédures concernant l'action de contrôle des paramètres,
- écriture de tout ce qui concerne la phase de composition et le jeu d'une registration.

7. CONCLUSION.

La mise au point du processeur CTR (cf B.5) a retardé la construction de la maquette CORDIS. Il n'est pas possible de présenter, dans ce rapport, un bilan de l'utilisation de cette dernière. Les différents rôles qu'elle devrait remplir sont néanmoins connus. Nous allons les énumérer avant de tirer le bilan de la construction de cette maquette.

Rôle de la maquette Cordis.

Le but principal, à brève échéance, du projet dans lequel s'inscrivait cette thèse est la construction d'un "outil de création" complet et utilisable à des fins artistiques (cf A.4.5). A ce titre, il doit tenir compte des aspects sonores et des aspects visuels donc réunir les qualités du système CORDIS (cf B.2) et celles du système ANIMA [LUCIANI 1985]. L'environnement matériel sera plus conséquent que celui de la maquette CORDIS, il comportera un ordinateur VAX730 et un processeur vectoriel APL20B. La maquette Cordis, en tant que système complet pour la simulation des mécanismes instrumentaux est un banc d'essai ; la connaissance de ses qualités (et de ses défauts) sont des acquis pour la conception du futur outil de création.

La maquette Cordis, considérée comme un tout, est un moyen d'évaluer les divers éléments qui la composent ou l'ont déterminée, à savoir : les transducteurs, la modélisation et l'algorithmique proposées par CORDISV2, le Langage Cordis Temps-Réel (LCTR) et le logiciel Cordis Temps-Réel (lCTR).

- a) Des simulations de mécanismes instrumentaux seront mises en place afin d'explorer le champ expérimental ouvert par la maquette et d'apprécier le domaine des mécanismes couverts et le domaine sonore qui en découle.
- b) En plus des transducteurs déjà existants, (et moyennant quelques modifications du programme), la maquette pourrait servir à l'évaluation de nouveaux transducteurs.
- c) La pratique du "LCTR" permettra de mesurer sa difficulté d'apprentissage et l'intérêt des notions de "constituant intermédiaire", "ensemble d'instruments", "registration"... L'utilisation des "registrations", éléments embryonnaires d'un système compositionnel applicable aux objets complexes "gestes-instruments", devrait aider à la mise en place de langage compositionnel plus évolué.

- d) Le "ICTR" propose un type de dialogue interactif qui doit être utilisé puis critiqué afin d'en connaître les points forts et les points faibles.

Des premières expériences psychoperceptives devraient pouvoir être esquissées. Elles concerneraient la relation geste-ouïe ou, plus généralement, les différentes interactions entre les canaux sensoriels. On souhaite, par ailleurs, obtenir des indications sur la manière dont s'affinent les gestes quand ils s'appliquent sur des mécanismes instrumentaux inconnus.

Bilan de la construction de la maquette

La maquette Cordis résulte de la volonté d'aboutir à une réalisation pour au moins deux raisons essentielles en dehors de celles ci-dessus exprimées :

- a) La phase de construction de la maquette a permis d'apprécier le chemin à parcourir, du concept d'outil de création, à une réalisation (cf B.6.1). Parcourir ce chemin oblige à poser tous les problèmes et à les résoudre d'une façon ou d'une autre. A chaque étape, d'importantes simplifications sont nécessaires tant théoriques que pratiques. Les simplifications pratiques sont fonction de l'état de la technologie informatique et mécanique.
- b) Malgré les contraintes, il était utile de montrer, en pratique, l'intérêt de la prise en compte de l'expérience instrumentale. L'expérience de "pincement d'une corde" par un opérateur humain (cf B.5.1.2) fut à cet égard décisive. Elle permet une compréhension "sensorielle" immédiate de l'importance de la notion de "retour d'effort".

La construction de la maquette a permis d'approfondir et de reformuler deux types de problèmes différents :

- a) la liaison ordinateur hôte-périphérique spécialisé pour la synthèse en temps réel des sons doit (cf B.2.5) :
 - comporter un interface qui fonctionne suivant le principe de l'accès direct mémoire,
 - assurer un "filtrage d'adaptation" passe-bas sans gain et de pente de coupure raide, entre calcul "lent" et calcul "rapide".
- b) L'annexe (voir pages suivantes) relate les calculs réalisés à propos des algorithmes de simulation de CORDISV2.

- Ces calculs permettent de mieux cerner le comportement des algorithmes. Ceux-ci ne représentent qu'eux-mêmes pour certains intervalles de valeurs de leurs paramètres où il est impossible de les relier à un modèle physique.

- Une nouvelle phase de réflexion est amorcée sur les méthodes de calcul numérique à employer. Celles-ci sont actuellement à l'étude avant leur utilisation dans le nouvel "outil de création" actuellement en construction.

ANNEXE

ALGORITHMES de CORDISV2

PLAN DE L'ANNEXE

1. Solution de l'algorithme de simulation d'une cellule de CORDISV2.

1.1 Introduction.

1.2 Equations.

1.3 Comparaison des modèles échantillonné et physique d'une cellule

2. Modélisation d'une corde homogène discrétisée.

2.1 Equations.

2.2 Résolution.

2.3 Valeurs des coefficients C_i

2.4 Conséquences sur les valeurs de raideur et frottement numériques.

2.5 Application numérique.

2.6 Conclusion.

1. Solution de l'algorithme de simulation d'une cellule de CORDISV2.

1.1. Introduction.

La cellule, dans la modélisation proposée par CORDISV2, est l'assemblage d'une masse, d'un ressort, et d'un frottement. Elle représente donc un point matériel soumis à une force de rappel et une force de frottement visqueux. Elle est l'élément vibrant élémentaire de CORDISV2 ; à une cellule correspond un mode vibratoire.

Ce paragraphe est un additif au travail de Talin BERBERYAN(1979 pl4) sur la cellule. Certaines des formules qu'elle a démontrées seront ici simplement rappelées.

1.2. Equations.

1.2.1.

L'équation différentielle d'une cellule, non soumise à une contrainte extérieure est l'équation classique du deuxième ordre :

$$mx''(t) = -kx(t) - zx'(t)$$

où,

m représente la masse de la cellule en kg

k est un coefficient de raideur en N/m

z est un coefficient de frottement en Ns/m

$x(t)$, $x'(t)$, $x''(t)$ représentent respectivement la position, la vitesse et l'accélération du point matériel à l'instant t.

1.2.2.

Vu les conventions de CORDISV2 (cf B.3.2.4), l'algorithme de simulation d'une cellule est :

$$(1) \quad X(n) = (2 - K - Z).X(n-1) + (Z - 1).X(n-2)$$

T_e est la période d'échantillonnage

$F_e = 1/T_e$ est la fréquence d'échantillonnage

$X(n)$ est la position à l'instant nT_e du modèle échantillonné de la cellule

K est lié à k par $K = kT_e^2/m$

Z est lié à z par $Z = zT_e/m$

K et Z sont ici appelés raideur et frottement numériques.

1.2.3.

La solution générale de cette équation aux différences est une combinaison linéaire de deux suites arithmétiques de raisons complexes R1 et R2. R1 et R2 sont les solutions de l'équation caractéristique en E :

$$1 - (2 - K - Z)E - (Z-1)E^2 = 0$$

a) Si le discriminant DELTA de l'équation est négatif, alors, R1 et R2 sont complexes conjuguées. La solution de l'équation (1) est alors une sinusoïde amortie. Sa pulsation numérique W, en radians, est donnée par (BERBERYAN 1979):

$$(1a) \quad W = \text{Arcos} \frac{2 - K - Z}{2\sqrt{1 - Z}}$$

W est relié à la fréquence f, effectivement produite par un calcul périodique de période Te par :

$$(1b) \quad f = W \cdot T_e / 2$$

b) Si DELTA < 0, R1 et R2 sont réelles.

Si Z > 1 le produit des racines est négatif, donc une des deux racines est négative. La solution de (1) contient donc un terme en série alternée.

Si Z < 1, les deux racines sont de même signe.

Si K + Z < 2, les deux racines sont positives

Si K + Z > 2, les deux racines sont négatives, la solution de (1) est donc formée de deux termes en série alternée.

Dans le cas où il y a des termes de série alternée, la solution de (1) diverge si la racine négative est inférieure à -1.

On démontre facilement qu'il y a divergence si $2Z > 4 - K$.

la figure 14 donne alors les différents domaines possibles pour les solutions de (1) en fonction de K et Z.

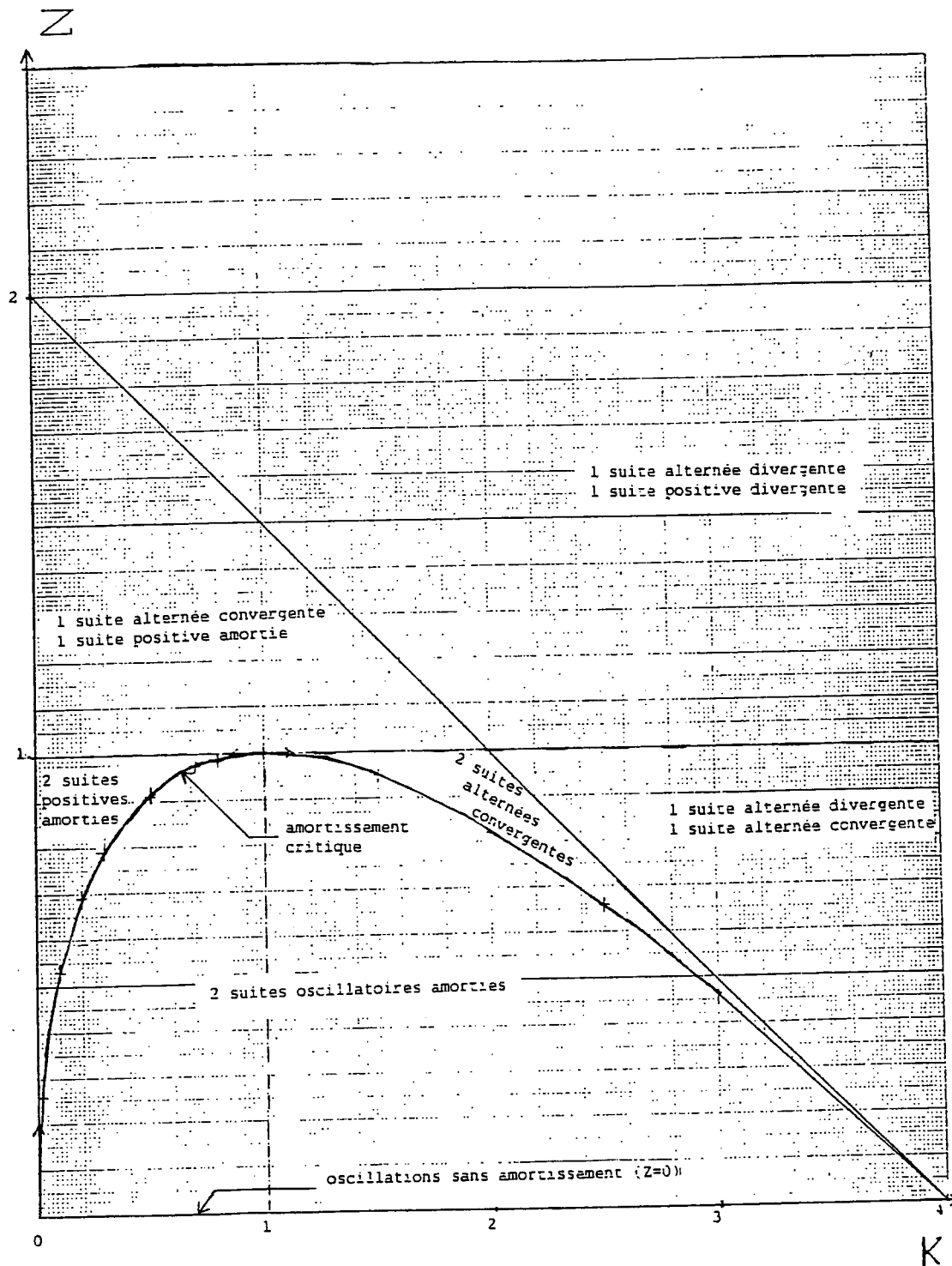


Figure 14

1.3. Comparaison des modèles échantillonné et physique d'une cellule.

BERBERYAN(1979) montre une bonne cohérence entre les deux modèles pour les faibles valeurs de K et Z. Elle démontre également que le modèle échantillonné n'a pas de sens physique pour $K > 4$ ou $Z > 1$. Nous allons affiner ces limites.

1.3.1.

Dès qu'apparaissent des termes de suites alternées, l'équation (1) n'a plus de lien avec un quelconque modèle physique, vu les discontinuités de ses solutions.

1.3.2.

Par ailleurs, considérons la formule donnant la pulsation de la cellule :

- pour le modèle échantillonné :

$$(1a) \quad W = \text{Arcos} \frac{2 - K - Z}{2\sqrt{1 - Z}}$$

- pour le modèle physique :

$$w = \sqrt{4k - z^2/2}$$

La figure 15 montre le réseau des courbes $W(Z)$ en fonction de K. L'allure de ces courbes est fort variable.

Or dans le cas du modèle physique, le réseau des courbes $w(z)$ en fonction de k est formé de morceaux de parabole où, quelle que soit la valeur de k, w décroît et tend vers zéro si z croît.

Pour $K > 1$, les courbes $W(Z)$ deviennent croissantes alors que les courbes $w(z)$ sont toujours décroissantes. Si le modèle échantillonné d'une cellule possède, pour $K > 1$, des solutions oscillatoires amorties, il ne possède pas de solution amortie sans oscillations ; elle est remplacée par des suites alternées convergentes.

Donc, on ne peut établir une correspondance correcte entre les deux modèles que si $K < 1$.

Il apparaît donc une région "physique" et des régions non physiques pour le couple (K,Z). Dans la zone "physique", modèle échantillonné et physique ont même allure de comportement, un même comportement qualitatif (il existe toujours des différences quantitatives entre W et w [BERBERYAN 1979]).

La région physique du couple (K,Z) est le rectangle délimité par les droites $Z = 0$, $K = 0$, $K = 1$, $Z = 1$.

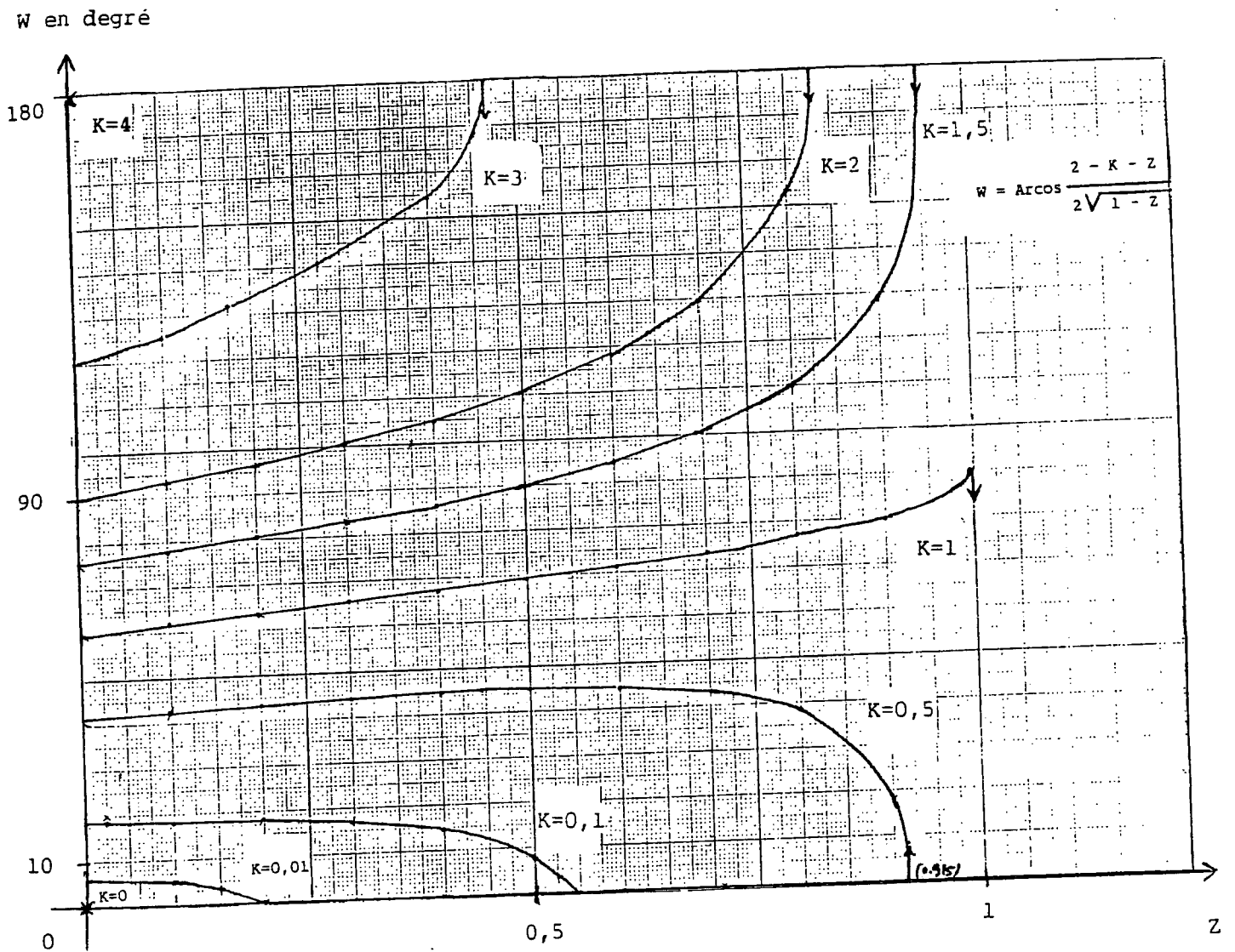


Figure 15

2. Modélisation d'une corde homogène discrétisée.

2.1. Equations.

La corde homogène discrétisée, modèle physique discrétisé d'une corde, a été présentée au paragraphe B.3.2.5. Elle est composée de p masses reliées entre elles par des ressorts et des frottements ; les deux masses extrêmes sont chacune reliées au sol par un ressort et un frottement. Le mot corde est un terme générique pour désigner des lignes vibrantes formées de 1, 2, p masses.

On s'inspire, pour les notations, de celles utilisées par Talin BERBERYAN(1979) afin de garder une unité dans nos documents. On considère dans ce paragraphe la corde échantillonnée, modèle échantillonné d'une corde, résultant de la mise en algorithme de la corde homogène discrétisée.

Soit $X_i(n)$, la position à l'instant nT_e de la masse numéro i . T_e est la période d'échantillonnage, F_e la fréquence d'échantillonnage.

Pour $p > 1$, l'algorithme de la corde est formé par le système d'équations ci-dessous. Il est constitué de p équations du type (BERBERYAN 1979 p49) :

$$(2) \quad AX_i(n) + BX_{i-1}(n) + BX_{i+1}(n) = 0$$

avec

$$A = 1 - E(2 - 2k - 2z) - E^2(2z - 1),$$

$$B = -(k + z)E + zE^2,$$

où E représente l'opérateur linéaire de la transformée en z :

$$E[X_i(n)] = X_i(n-1),$$

k, z représentent respectivement les constantes de raideur et de frottement numériques réparties de la corde, $(k, z) \neq (0, 0)$.

2.2. Résolution.

Pour que ce système d'équations simule une corde discrétisée, il doit exister p solutions distinctes. Donc le déterminant DET , correspondant à la matrice du système d'équations ci-dessus doit être nul et posséder p racines distinctes.

Or, à une solution correspond une équation caractéristique de la forme de celle d'une cellule :

$$1 - (2 - K - Z)E - (Z - 1)E^2 = 0$$

DET doit donc être de la forme :

$$DET = \prod_{i=1}^n [1 - (2 - K_i - Z_i)E - (Z_i - 1)E^2] .$$

Par ailleurs, DET est un polynôme homogène en A, B ; donc il existe p coefficients C_i tels que :

$$DET = \prod_{i=1}^n (A + C_i.B) .$$

Identifiant les deux décompositions, on obtient pour $0 < i < n+1$:

$$\begin{aligned} K_i &= (2 + C_i)k \\ Z_i &= (2 + C_i)z \end{aligned}$$

Autrement dit, le système d'équations (2) est équivalent à p équations du type (1).

Physiquement cela revient à dire que la corde à p masses est équivalente en ce qui concerne les modes à p cellules. Le système d'équations (2) n'aura donc de correspondant physique que si les p équations de type (1) ont un sens physique. Il faut pour cela que, quel que soit i, K_i et Z_i appartiennent à la région "physique" de la figure 14.

2.3. Valeurs des coefficients C_i .

BERBERYAN(1979 p59) calcule les K_i en fonction de k dans le cas particulier où $z = 0$.

Comme $K_i = (2 + C_i)k$, on en déduit :

$$C_i = 2\cos[i\pi/(p+1)] \text{ pour } 0 < i < p+1.$$

2.4. Conséquences sur les valeurs de raideur et frottement numériques.

On constate immédiatement que $-2 < C_i < +2$.
Donc, $0 < K_i < 4k$ et $0 < Z_i < 4z$.

Pour que (K_i, Z_i) soit dans la région physique de la figure 14, quel que soit le nombre p de masses considérées, il faut :

$$\begin{aligned} k &< 0.25 \\ z &< 0.25 . \end{aligned}$$

p	C _{max}	k _{max}	z _{max}	f _{max} /Fe	f _{max} (Fe = 25.6KHZ)
1	-	1	1	0.166667	4400.000000
2	1.000000	0.333333	0.333333	0.093215	2386.297607
3	1.414214	0.292893	0.292893	0.066405	1699.961670
4	1.618034	0.276393	0.276393	0.051943	1329.735596
5	1.732051	0.267949	0.267949	0.042774	1095.015669
6	1.801938	0.263024	0.263024	0.036405	931.978149
7	1.847759	0.259892	0.259892	0.031710	811.784058
8	1.879385	0.257773	0.257773	0.028100	719.354736
9	1.902113	0.256271	0.256271	0.025234	645.992493
10	1.918986	0.255168	0.255168	0.022903	586.311157
11	1.931852	0.254333	0.254333	0.020968	536.786757
12	1.941884	0.253686	0.253686	0.019337	495.021681
13	1.949856	0.253174	0.253174	0.017942	459.314117
14	1.956295	0.252762	0.252762	0.016736	428.430267
15	1.961571	0.252425	0.252425	0.015682	401.452789
16	1.965946	0.252147	0.252147	0.014753	377.680878
17	1.969615	0.251914	0.251914	0.013929	356.574951
18	1.972723	0.251717	0.251717	0.013192	337.708058
19	1.975377	0.251548	0.251548	0.012529	320.742096

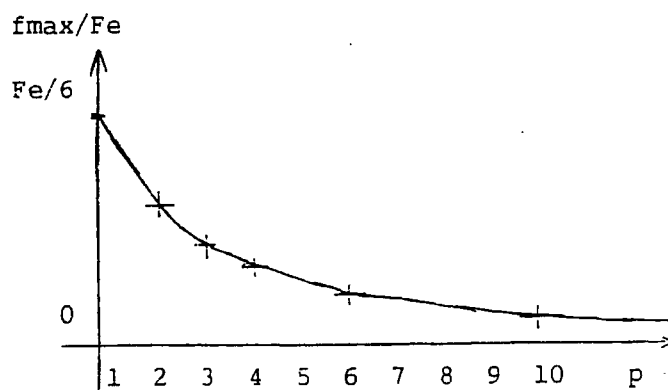
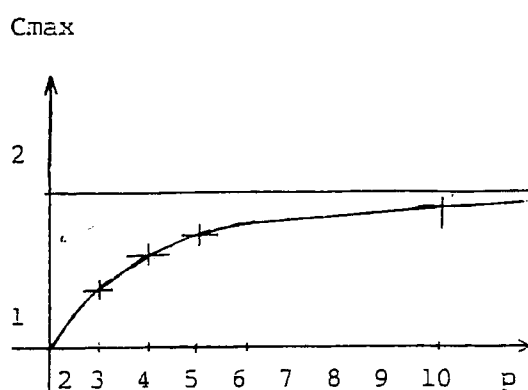
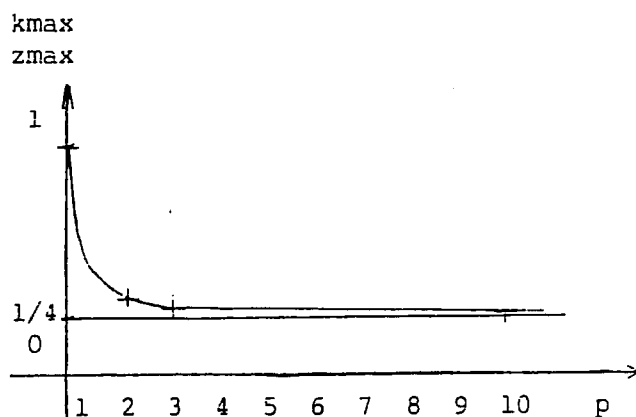


Figure 16

2.5. Application numérique.

On savait d'avance, d'après le théorème de Shannon, que le modèle échantillonné ne pourrait représenter le modèle physique discrétisé que pour le domaine de fréquence $[0, Fe/2]$. L'étude de l'algorithme de simulation d'une cellule a montré que la valeur maximale de K_i et Z_i admissible est l'entier 1. Les expériences montrent, qu'en pratique, une corde ne "sonne" que si son amortissement Z est faible. Utilisant les équations (1a) et (1b) pour $K=1$ et $Z=0$, on déduit immédiatement que le modèle échantillonné d'une corde n'a une correspondance physique que si son spectre est compris dans la plage $[0, Fe/6]$

Il nous a paru intéressant, toujours dans le cadre des cordes simulables avec l'algorithmique de CORDISV2, de dresser le tableau et les courbes (cf figure 17) des constantes de raideur et frottement numériques maximales (k_{max} et z_{max}), en fonction du nombre de points matériels, p , de la corde, pour lesquelles le modèle échantillonné représente correctement le modèle physique. Si des valeurs supérieures à k_{max} et z_{max} sont utilisées, le système d'algorithmes de CORDISV2 ne représente que lui-même. Il peut générer des sons, mais ceux-ci n'ont plus de correspondance avec un modèle physique discrétisé.

Par ailleurs, le spectre d'une corde est constitué de p modes, dont le plus faible est appelé fondamental. Le spectre des cordes est borné supérieurement par $Fe/6$ Hz. Le fondamental est donc lui aussi borné supérieurement. Cette borne est appelé f_{max} . Une corde de fondamental inférieur à f_{max} a un sens physique. La figure 16 montre aussi l'évolution du plus grand des coefficients C_i , C_{max} , en fonction de p , nombre de masses de la corde.

Les formules permettant le calcul de C_{max} , k_{max} , z_{max} , f_{max} , en fonction de p sont :

$$C_{max} = 2\cos[\pi/(p+1)]$$

$$k_{max} = z_{max} = 1/(2+C_{max})$$

$$f_{max}/Fe = (1/2\pi)\text{Arcos}[(2-k_{min})/2] \text{ avec } k_{min} = (2 - C_{max})/(2 + C_{max})$$

Un développement limité au voisinage de $C_{max}=2$ donne :

$$f_{max}/Fe \approx 1/[4(p+1)].$$

On constate, par exemple, que le système d'algorithmes de CORDISV2 ne permet de simuler une corde homogène à douze masses que si son fondamental est inférieur à environ 500 Hz.

2.6. Conclusion.

La problématique reste probablement inchangée si, au lieu d'une corde homogène, on considère un réseau quelconque bâti à partir de module de CORDISV2, y compris des modules de liaisons conditionnelles non linéaires. Plus la structure est complexe, c'est-à-dire son nombre de modules élevé, plus le nombre de ses modes vibratoires, chacun caractérisable par un couple du type (K_i, Z_i) , augmente. K_i et Z_i seront des fonctions des différentes valeurs de raideurs et frottements réparties dans le réseau. Ces valeurs devront être telles que (K_i, Z_i) appartiennent à la région physique de la figure 15. La résolution générale de ce problème de valeurs maximales des raideurs et frottements numériques n'a pas été abordée. Il est probable que si toutes ces grandeurs sont plus petites que 0,25, alors la simulation numérique garde le lien avec le modèle physique.

Dans le cadre de la maquette CORDIS, la fréquence d'échantillonnage rapide maximale est de 25,6 kHz.

$$F_e/6 = 4,4 \text{ kHz.}$$

L'algorithmique de CORDISV2, associée à une fréquence d'échantillonnage aussi faible, limite considérablement le domaine des simulations réalistes possibles. Si la fréquence d'échantillonnage était de l'ordre de 120 kHz, l'algorithmique de CORDISV2 serait plus apte à simuler l'ensemble des mécanismes instrumentaux générant des sons audibles (la bande passante de l'oreille humaine est d'environ 20 kHz).

Ces calculs suggèrent une nouvelle méthode d'"algorithmique". Celle-ci est encore à l'étude. Elle a été esquissée par Jean-Loup FLORENS à la suite de discussions qui ont permis d'aboutir aux calculs exposés dans cette annexe. Le type de calcul (résolution d'un système d'équations aux différences) réalisé ici manuellement dans le cas particulier d'une "corde homogène" pourrait être programmé dans le cas général (un processeur vectoriel est particulièrement adapté à ce type de problème). Les calculs aboutissent à la détermination des valeurs propres qui correspondent aux modes (vibratoires ou non) d'une structure. Ils permettent de connaître la matrice de transfert de l'univers mécanique vers l'univers acoustique. On pourrait alors, dans l'univers acoustique, supprimer toutes les composantes sans sens physique et fabriquer un modèle approché du modèle algorithmique qui serait plus proche du modèle physique. Cette méthode qui s'apparente à une analyse de donnée en composantes principales permettrait de gagner du temps de calcul en phase de jeu et assurerait une meilleure relation entre modèle physique et modèle représenté dans l'ordinateur.

BIBLIOGRAPHIE

- ALLES, H.G., "Music synthesis using real time digital techniques," Proc. I.E.E.E., vol. 68, no. 4, pp. 436-449, 1980.
- ALLOUIS, J.F., "Un système multiprocesseur de synthèse digitale en temps réel," Cahier recherche-musique, no. 3, pp. 62-90, INA-GRM, Paris, 1976.
- ALLOUIS, J.F., "Use of high speed microprocessors for digital synthesis," C.Music.J, vol. 3, no. 1, pp. 14-16, 1979.
- ARFIB, D., "Digital synthesis of complex audio spectra by means of multiplication of nonlinear distorted sine waves .," J.A.E.S, vol. 27, no. 10, pp. 757-768, 1979.
- ARFIB, D., L'usage musical de la synthèse de spectre complexe par distortion non linéaire et modulation d'amplitude, Université Aix-Marseille 2, Marseille , 1er juillet 1983. Thèse d'état.
- BERBERYAN, T., Application des processus récursifs à la synthèse sonore, I.N.P.G, Grenoble, 1979. DEA d'électronique.
- BERBERYAN, T., Etude et réalisation d'un calculateur spécialisé pour la synthèse sonore en temps réel par simulation de mécanismes instrumentaux, I.N.P.G, Grenoble, 6 décembre 1982. Thèse docteur-ingénieur.
- BEVER, T. & R. CHIARELLO, "Cerebral dominance in musicians and nonmusicians," Science, vol. 185, pp. 537-539, 9 août 1974.
- BRANCHI, W., "la communication musicale : "pensée et moyen électronique", in Computer Music, pp. 73-84, Commission Canadienne pour l' Unesco, 1980. Rencontre d'Aarhus 1978.
- BROWN, F., R. LEHMANN, & G. KLEIN, "Le programme de synthèse des sons AUDITU," Rev.Acous, vol. 38, pp. 206-210, 1976.
- BROWN, F. & R. LEHMANN, "Synthèse rapide des sons musicaux," Rev.Acous, vol. 38, pp. 211-215, 1976.

- BUXTON, W., W REEVES, R BAECKER, & L MESEI, "The use of hierarchy and instance in a data structure for computer music," C.Music.J, vol. 2, no. 4, pp. 10-20, 1978.
- BUXTON, W., E.A FOGELS, G. FEDORKOW, L. SASAKI, & K.C SMITH, "An introduction to the SSSP digital synthesizer," C.Music.J, vol. 2, no. 4, pp. 28-38, 1978.
- BUXTON, W., R. SNIDERMAN, W. REEVES, S. PATEL, & R. BAECKER, "The evolution of the SSSP score editing tools," C.Music.J, vol. 3, no. 4, pp. 14-25, 1979.
- BUXTON, W., W.REEVES, G. FEDORKOW, K.C. SMITH, & R. BAECKER, "A microcomputer-based conducting system," C.Music.J, vol. 4, no. 1, pp. 8-21, 1980.
- BUXTON, W., S. PATEL, W. REEVES, & R. BAECKER, "Scope in interactive score editors," C.Music.J, vol. 5, no. 3, pp. 50-56, 1981.
- BUXTON, W., S. PATEL, W. REEVES, & R. BAECKER, "OBJED and the design of timbral resources," C.Music.J, vol. 6, no. 2, pp. 32-44, 1982.
- CADOZ, C. & J.L FLORENS, "Fondement d'une démarche de recherche informatique/musique," Rev. Acous., no. 45, pp. 86-101, 1978.
- CADOZ, C., Synthèse sonore par simulation de mécanismes vibratoires, I.N.P.G, Grenoble, 15 octobre 1979. Thèse 3ème cycle.
- CADOZ, C., A LUCIANI, & J.L FLORENS, "Synthèse musicale par simulation des mécanismes instrumentaux. Transducteurs gestuels rétroactifs pour l'étude du jeu instrumental .," Rev. Acous., no. 59, pp. 279-292, 1981.
- CADOZ, C., Description du programme CORDIS logiciel version 2, Grenoble, 1982. Rapport interne de l' ACROE.
- CADOZ, C., A. LUCIANI, & J.L. FLORENS, Synthèse sonore par simulation mécanique de l'instrument ; le langage CORDIS, 9, pp. 1-4, Paris, 1983. 11ème I.C.A.
- CHARBONNEAU, G., P KARATCHENZEFFP, & J.C RISSET, "Un système de synthèse directe des sons à l'aide d'ordinateurs," Rev. Acous., no. 21, pp. 289-296, 1972.
- CHARBONNEAU, G. & J.C RISSET, "Circularité de hauteur sonore," C.R. Acad. Sci , vol. 277, pp. 623-626, 1973. série B.

- CHARBONNEAU, G. & J.C. RISSET, "Jugements relatifs de hauteur : schéma linéaires et hélicoïdaux," C.R. Acad. Sci, vol. 281, pp. 289-292, 1975. série B.
- CHARBONNEAU, G. & J.C. RISSET, "Différences entre oreille droite et oreille gauche pour la perception de la hauteur des sons," C.R. Acad. Sci, vol. 281, pp. 163-166, 1975. série D.
- CHARBONNEAU, G., "Effets perceptifs de la réduction des données dans la reconnaissance du timbre," C.R. Acad. Sci, vol. 289, pp. 147-149, 22 octobre 1979. série B.
- CHOWNING, J., "The synthesis of complex audio spectra by means of frequency modulation," J.A.E.S, vol. 21, no. 7, pp. 526-534, 1973.
- CHOWNING, J., "La nouvelle musique et la science interdépendance de concept," in Le compositeur et l'ordinateur, IRCAM, Paris, 1981.
- DELALANDE, F., l'enfant du sonore au musical, INA-GRM Buchet-Castel, Paris, 1982.
- DI-GIUGNO, P. & H.G. ALLES, "A one card 64 channel digital synthesizer," C.Music.J, vol. 1, no. 4, pp. 7-11, 1977.
- DI-GIUGNO, P. & J. KOTT, "Présentation du système 4X, processeur numérique de signal en temps réel," Rapport IRCAM, vol. 32, Paris, 1981.
- DUFOURT, H., "L'artifice d'écriture dans la musique occidentale," Revue Critique, vol. 287, pp. 465-477, Paris, 1977.
- DURR, B., "Le synthétiseur," cahier recherche-musique, no. 3, pp. 11-28, INA-GRM, paris, 1976.
- EHRESMAN, D. & D. WESSEL, "Perception of timbral analogies," Rapport IRCAM, no. 13, Paris, 1978.
- FLORENS, J.L., Coupleur gestuel interactif pour la commande et le contrôle de sons synthétisés en temps réel, I.N.P.G, Grenoble, 1978. Thèse troisième cycle.
- FLORENS, J.L. & C. CADOZ, "Geste instrumental, ordinateur, transducteurs gestuels rétroactifs," in 10ème ICMC, pp. 59-61, IRCAM, Paris, 1984.
- FRANCES, R., La perception de la musique, Vrin, Paris, 1958. 3ème édition 1984.

- FRANCES, R., *La perception*, P.U.F, Paris, 1963. 6ème édition 1981.
- GREY, J.M., "An exploration of musical timbre," Rapport STAN-M-2, CCRMA, Stanford, 1975. Department of music.
- GREY, J.M., "Multidimensional perceptual scaling of musical timbres," J.A.S.A, vol. 61, no. 5, pp. 1270-1276, 1977.
- GREY, J.M. & J.A. MOORER, "Perceptual evaluations of synthesized musical instrument tones," J.A.S.A, vol. 62, no. 2, pp. 454-462, 1977.
- GREY, J.M. & J.W. GORDON, "Perceptual effects of spectral modifications on musical timbres," J.A.S.A, vol. 63, no. 5, pp. 1493-1499, 1978.
- HARNONCOURT, N., *Le discours musical*, Gallimard, Paris, 1984.
- HAYNES, S., *The musician-machine interface in digital sound synthesis*, Thèse Université de Southampton (G.B), 1980.
- HILLER, L.A and L.M ISAACSON, "Musical composition with a high speed digital computer," J.A.E.S, vol. 6, no. 3, pp. 154-160, 1958.
- JAFFE, D.A. & J.O SMITH, "Extension of the Karplus-Strong algorithm," C.Music.J, vol. 7, no. 3, pp. 56-69, 1983.
- KAEGI, W. & S. TEMPELAARS, "VOSIM, a new sound synthesis system," J.A.E.S, vol. 26, no. 6, pp. 418-425, 1978.
- KAPLAN, S.J., "Developping a commercial digital sound synthesis system," C.Music.J, vol. 5, no. 3, pp. 62-73, 1981.
- KARPLUS, K. & A. STRONG, "Digital synthesis of plucked string and drum timbres," C.Music.J, vol. 7, no. 3, pp. 43-56, 1983.
- LACORNERIE, P., *Dialogue homme-machine pour la synthèse sonore par simulation de mécanismes vibratoires*, I.N.P.G, Grenoble, 1982. DEA d'électronique.
- LEBRUN, M., "Digital waveshaping synthesis," J.A.E.S, vol. 27, no. 4, pp. 250-265, 1979.
- LIU, H.L., C. MEAD, J. WAWRZYNEK, & L. DYER, "Models for real time music synthesis using UPEs," in 10ème ICMC, p. 173, IRCAM, Paris, 1984.
- LUCIANI, A., I.N.P.G, Grenoble, à paraître en 1985 . Thèse docteur-ingénieur.

- MAILLIARD, B., J.F. ALLOUIS, & Y. GESLIN, "The GRM digital studio for treating natural sounds, its aim and method," in *Numero et suono*, p. 208, Venice, 1982. 8ème ICMC.
- MATHEWS, M.V., "The digital computer as a musical instrument," *Science*, vol. 142, pp. 553-557, 1^{er} novembre 1963.
- MATHEWS, M.V., J.E MILLER, F.R MOORE, J.R PIERCE, & J.C RISSET, *The technology of computer music*, M.I.T Press, 1969.
- MATHEWS, M.V. & F.R MOORE, "GROOVE, a program to compose, store and edit functions of time," *Communication of the A.C.M*, vol. 13, no. 12, pp. 715-721, 1970.
- MATHEWS, M.V., "Le studio de sons électroniques des années 70," *Revue musicale*, no. 268-269, pp. 125-137, Richard Masse, Paris, 1971. Réunion de Stockholm 1970.
- MATHEWS, M.V., F.R MOORE, & J.C RISSET, "Computers and future music," *Science*, vol. 183, pp. 263-268, 25 janvier 1974.
- MATHEWS, M.V. & C. ABBOTT, "The sequential Drum," *C.Music.J*, vol. 4, no. 4, pp. 45-58, 1980.
- MCADAMS, S. & A. BREGMAN, "Hearing musical streams," *C.Music.J*, vol. 3, no. 4, pp. 26-43, 1979.
- MCADAMS, S., "Spectral fusion and the creation of auditory images," in *Music, Mind and Brain*, ed. Manfred Clynes, Plenum Press, New-York, 1982.
- MITSUHASHI, Y., "Waveshape parameter modulation in producing complex audio spectra," *J.A.E.S*, vol. 28, no. 12, 1980.
- MITSUHASHI, Y., "Musical sound synthesis by forward differences," *J.A.E.S*, vol. 30, no. 1/2, pp. 2-9, 1982.
- MOLES, A., *Théorie de l'information et perception esthétique*, Denoël, Paris, 1958. 2ème édition 1972.
- MOORE, F.R., "The computer audio research laboratory at UCSD," *C.Music.J*, vol. 6, no. 1, pp. 18-29, 1982.
- MOORER, J.A., "The synthesis of complex audio spectra by means of discrete summation formulas," *J.A.E.S*, vol. 24, no. 9, pp. 717-727, 1976.
- MOORER, J.A., "Signal processing of computer music : a survey," *Proceedings I.E.E.E*, vol. 65, no. 8, pp. 1108-1137, 1977.

- MOORER, J.A., "The use of the linear prediction of speech in computer music application," Rapport IRCAM, no. 6, Paris, 1978.
- MOORER, J.A., A. CHAUVEAU, C. ABBOTT, P. EASTTY, & J. LAWSON, "The 4C machine," C.Music.J, vol. 3, no. 3, pp. 16-24, 1979.
- MOORER, J.A., "Synthesizers I have known and loved," C.Music.J, vol. 5, no. 1, pp. 4-12, 1981.
- MOORER, J.A., "The Lucas Film Audio Signal Processor," C.Music.J, vol. 6, no. 3, pp. 22-31, 1982.
- MORRILL, D., "Trumpet algorithms for computer composition," C.Music.J, vol. 1, no. 1, pp. 46-52, 1977.
- NILSONNE, A. & J. SUNDBERG, "Group differences in ability to judge emotional state from voice fundamental frequency," Q.P.S.R, vol. 2, no. 3, pp. 108-117, 1983.
- PIAGET, J. & B. INHELDER, La représentation de l'espace chez l'enfant, P.U.F, Paris, 1947. 4ème édition 1981.
- POLI, G. DE, "A tutorial on digital sound synthesis techniques," C.Music.J, vol. 7, no. 4, pp. 8-27, 1983.
- POTARD, Y., Etude sur la fusion d'un son harmonique à l'aide de l'ordinateur, Ecole des Mines de Nancy, Nancy, 23 octobre 1982. Thèse Docteur-ingénieur.
- RAZAFINDRAKOTO, A., Université 1, Grenoble, à paraître en 1985. Doctorat d'Université.
- RIOTTE, A., "Un modèle informatique pour la transformation continue des sons inharmoniques," in 10ème ICMC, pp. 36-37, IRCAM, Paris, 1984.
- RISSET, J.C., "Sur certains aspects fonctionnels de l'audition," Ann.telecomm., vol. 23, pp. 91-120, 1968.
- RISSET, J.C. & M.V MATHEWS, "Analysis of musical instrument tones," Physics ToDay, vol. 22, no. 2, pp. 23-30, 1969.
- RISSET, J.C., "L'ordinateur instrument de musique," Rev. Acous., no. 16, pp. 286-290, 1971.
- RISSET, J.C., Paradoxe de hauteur : le concept de hauteur sonore n'est pas le même pour tout le monde, Budapest, 1971. 7ème congrès I.C.A 20S10.

- RISSET, J.C., "Synthèse des sons à l'aide d'ordinateurs," *Revue Musicale*, no. 268-269, pp. 113-123, Richard Masse, Paris, 1971. Réunion de Stockholm 1970.
- RISSET, J.C., "Musique et informatique," in *La musique en projet*, pp. 48-67, Gallimard, Paris, 1975. cahier Renault-Barrault.
- RISSET, J.C., "Interview de 1975," cahier recherche-musique, no. 4, p. 108, INA-GRM, Paris, 1977.
- RISSET, J.C., "Hauteur et timbre des sons," *Rev.Acoust.*, vol. 42, pp. 263-268, 1977.
- RISSET, J.C., "The musical development of digital sound techniques," in *Computer music*, pp. 128-158, Commission canadienne pour l'UNESCO, Ottawa, 1980. Rencontre d'Aarhus 1978.
- RISSET, J.C., "Computer synthesis of sound applied to composition with sonic processes," in *Numero et suono*, p. 253, Venise, 1982. 8ème ICMC.
- RISSET, J.C. & D.W. WESSEL, "Exploration of timbre by analysis and synthesis," in *The psychology of music*, ed. Diana Deutsch, pp. 25-58, Academic Press, 1982.
- RISSET, J.C., "La synthèse numérique des sons a vingt-cinq ans : son impact sur l'acoustique musicale," 11ème I.C.A, vol. 8, pp. 65-73, Paris, 1983a.
- RISSET, J.C., "Electronique et création musicale," 11ème I.C.A, vol. 8, pp. 229-233, Paris, 1983b.
- RODET, X., J.B. BARRIERE, P. COINTE, & Y. POTARD, "The CHANT project : modelisation and production. An environment for composers including the formes language for describing and controlling sound and musical processes," in *Numero et suono*, p. 257, Venise, 1982. 8ème ICMC.
- RODET, X., "Le projet CHANT," in *Porte ouverte à l'IRCAM*, pp. 30-33, Paris, 1983. Colloque "le concept de recherche en musique".
- RODET, X., Y. POTARD, & J.B. BARRIERE, "The CHANT Project : From the synthesis of the singing voice to synthesis in general," *C.Music.J*, vol. 8, no. 4, pp. 15-31, 1984.
- RODET, X. & P. COINTE, "FORMES : Composition and scheduling of processes," *C.Music.J*, vol. 8, no. 4, pp. 32-50, 1984.
- ROLNICK, N., "A composer's note on the development and implementation of software for a digital synthesizer," rapport IRCAM, no. 18, Paris, 1978.

- RUIZ, P.M., A technique for simulating the vibrations of strings with a digital computer, University of Illinois, 1969. Department of music.
- SAMSON, P.R., "A general purpose digital synthesizer," J.A.E.S, vol. 28, no. 3, pp. 106-113, 1980.
- SCHAEFFER, P., "Vers une musique expérimentale," Revue Musicale, no. 236, pp. 11-27, Richard Masse, Paris, 1957.
- SCHAEFFER, P., Traité des Objets Musicaux, Seuil, Paris, 1966.
- SCHAEFFER, P., "interview de 1975," Cahier recherche -musique, no. 4, pp. 92-99, INA-GRM, Paris, 1977.
- SCHAEFFER, P., Postface au Traité des Objets Musicaux, Seuil, Paris, 1977. 2ème édition du Traité.
- SCHOTTSHAEDT, W., "Pla : A composer's idea of a language," C.Music.J, vol. 7, no. 1, pp. 11-21, 1983.
- SHEPPARD, R.N., "Circularity in judgment of relative pitch," J.A.S.A, vol. 36, no. 12, pp. 2346-2353, 1964.
- SMITH, S., "Score : a musician's approach to computer music," J.A.E.S, vol. 20, no. 1, pp. 7-14, 1972.
- VARESE, E., Ecrits, Christian Bourgeois, Paris, 1983.
- WARREN, R.M., "Perceptual restoration of missing speech sounds," Science, vol. 167, pp. 392-393, 23 janvier 1970.
- WAWRZYNEK, J., L. TZU-IN, & C. MEAD, "A VLSI approach to sound synthesis," in 10ème ICMC, p. 172, IRCAM, Paris, 1984.
- WESSEL, D. & B. SMITH, "Psychoacoustic aids for the musician's exploration of new material," in Proceeding ICMC 1977, pp. 192-194, San-Diego, 1977.
- WESSEL, D. & J.C. RISSET, "Les illusions auditives," Encyclopedia Universalis, pp. 167-171, Universalis, Paris, 1979.
- WESSEL, D., "Timbre space as a musical control structure," C.Music.J, vol. 3, no. 2, pp. 45-52, 1979.

AUTORISATION de SOUTENANCE

VU les dispositions de l'article 3 de l'arrêté du 16 avril 1974

VU les rapports de présentation de Messieurs

- . R. CARRE, Directeur de recherche et
- C. CADOZ, Docteur-Ingénieur
- . R. DESCOUT, Ingénieur

Monsieur Pierre LACORNERIE

est autorisé à présenter une thèse en soutenance en vue de l'obtention du diplôme de
DOCTEUR-INGENIEUR, spécialité "Electronique".

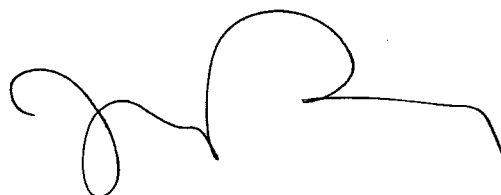
Fait à Grenoble, le 10 octobre 1985

D. BLOCH

Président

**de l'Institut National Polytechnique
de Grenoble**

P.O. le Vice-Président,



PIERRE LACORNERIE

DOCTORAT D'INGENIEUR

29 octobre 1985

I.N.P.G. - E.N.S. ELECTRONIQUE ET RADIOÉLECTRICITÉ DE GRENOBLE

RESUME

Un ensemble matériel et logiciel constitue une maquette préfigurant un système plus complet pour la création musicale à l'aide de l'ordinateur. Les justifications théoriques de ce système sont exposées et situées dans le cadre plus général de l'informatique musicale. Ce système utilise un procédé de synthèse sonore par simulation des mécanismes instrumentaux. L'environnement matériel de la maquette est construit autour d'un mini-ordinateur et d'un périphérique "temps-réel" spécialisé pour ce procédé de synthèse particulier. L'environnement logiciel résulte essentiellement de l'implantation d'un langage spécifique dont on donne les caractéristiques.

MOTS CLES

Informatique musicale / synthèse sonore / simulation des mécanismes instrumentaux / temps réel / dialogue homme-machine